

船舶技術研究所で開発された電子計算機 プログラムの概要—第5集—

目 次

1. 等高線図の作画プログラム	推進性能部	菅井信夫	1
2. 二次元揚力体周りのポテンシャル流の計算プログラム	推進性能部	児玉良明	2
3. 三次元非揚力体周りのポテンシャル流の計算プログラム	推進性能部	竹子春弥	3
4. 3次元乱流境界層第一近似解を用いた公称伴流数の推定プログラム	推進性能部	石坂純	5
5. 小型船などの安全性評価のための航走波計算プログラム	推進性能部	神蔵輝男	7
6. 変動圧力波形の Fourier 解析プログラム	推進性能部	岡本三千朗	8
7. 2重反転プロペラの設計及び性能計算プログラム	推進性能部	門井弘行	10
8. プロペラ単独特性の計算プログラム(無限翼数プロペラ理論による)	推進性能部(故)	森山文雄	14
9. Doublet-Lattice 法によるプロペラ揚力面の計算プログラム	推進性能部	小山鴻一	16
10. キャビテーション発生範囲の計算プログラム	推進性能部	石近良孝	18
11. 非線形水面波の伝播及び反射の計算プログラム	共通工学部	富田宏	21
12. 波浪中船体の非線形応答のシミュレーションプログラム	運動性能部	渡辺敏	22
13. 2次元浅水動揺流体力に及ぼす海底形状影響の計算プログラム	運動性能部	菅信	23
14. 3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響の計算プログラム	運動性能部	菅信	26
15. 境界要素法による楔の着水衝撃水圧の計算プログラム	共通工学部	谷澤克治	28
16. 2次元水中翼の特性計算プログラム	運動性能部	不破健	31
17. 強潮流域における船の転覆に関する操縦運動の計算プログラム	運動性能部	小川陽弘	34
18. 流速変動水域における船の操縦運動の計算プログラム	運動性能部	小川陽弘	35
19. 筏の太陽追尾シミュレーションプログラム	共通工学部	浜島金司	36
	海洋開発工学部	山川賢次	
20. 無限行無限列円柱群のポテンシャル流場の計算プログラム	運動性能部	菅信	37
21. ポテンシャル接続法による2次元流体力の計算プログラム	海洋開発工学部	大川豊	40
22. 浮遊式海洋構造物の運動計算プログラム	海洋開発工学部	加藤俊司	42
23. 3次元特異点分布法による動揺流体力計算プログラム	海洋開発工学部	大川豊	46
24. ランブドマス法による係留ラインの2次元動的解析プログラム	海洋開発工学部	加藤俊司	49
25. 待ち時間最小化による作業計画作成プログラム	機装部	金湖富士夫	51
26. タービン内再熱水素燃焼ガスタービンのサイクル計算プログラム	機関開発部	平岡克英	55
27. 中実回転円板の動的応力解析プログラム	機関開発部	天田重庚	57
28. 変動回転を受けるはりの過渡振動解析プログラム	機関開発部	天田重庚	58
29. 境界要素法による熱伝導解析プログラム	機関開発部	町田明正	59
30. ホログラフィ干渉法によるブンゼンバーナ火炎の温度計算プログラム	機関性能部	佐藤誠四郎	60
31. 燃焼ガスの平衡組成計算プログラム	機関性能部	山岸進	62
32. 一体型炉蒸気発生器静特性解析プログラム	原子力船舶部	松岡猛	64

33. 一体型船用炉自然循環実験解析プログラム	原子力船部	松岡	猛	66
34. フォールト・ツリー解析における不確実さ解析プログラム“SAMPLE”	原子力船部	松岡	猛	68
35. キャスク周辺線量率分布計算コードシステム	原子力船部	山越	寿夫	69
36. 一次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-PL, SP-Br	東海支所	竹内	清	71
37. 二次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-2DCY-FC	東海支所	竹内	清	72
38. 屈曲ダクト問題に対する2次元 PALLAS コードによる接続計算用補充プログラム	原子力船部	金井	康二	73

原稿受付：昭和59年5月

An Outline of Programs Compiled in Ship Research Institute —No. 5—

Contents

1. Graphic Program for Contour-Curve Diagram.....	By Nobuo SUGAI.....	1
2. Calculation of Potential Flow around a Two-dimensional Lifting Body	By Yoshiaki KODAMA.....	2
3. Calculation Program of Double Model Potential Flow by Hess and Smith's Method	By Haruya TAKESHI.....	3
4. Program for Nominal-Wake-Coefficient-Estimation Applying Theory of Three- dimensional Turbulent Boundary Layer	By Jun ISHIZAKA.....	5
5. Calculation of Ship Running Waves for Evaluating Traffic Safety at Small Ships	By Teruo KAMIKURA.....	7
6. Fourier Analysis for Records of Fluctuating Pressure	By Michio OKAMOTO.....	8
7. The Design of Contra-rotating Propeller	By Hiroyuki KADOI.....	10
8. Approximate Calculation Method for Estimating the Propeller Performance by Infinitely Bladed Propeller Theory	By the late Fumio MORIYAMA.....	14
9. Program for Calculation of Propeller Lifting Surface by Doublet-Lattice Method	By Kohichi KOYAMA.....	16
10. Computer Program for the Prediction of Cavitation Extent on a Marine Propeller Working in Non-Uniform Flow by Combination of Quasi-steady Cavity Theory and Strip Theory	By Yoshitaka UKON.....	18
11. Program of Calculation of Propagation and Reflection of Non-linear Water Waves	By Hiroshi TOMITA.....	21
12. Simulation of Non-linear Responses of an Elastic Hull in Waves	By Iwao WATANABE.....	22
13. Program for Calculation of Two-dimensional Hydrodynamic Force in Shallow Water with Irregular Bottom Shape	By Makoto KAN.....	23
14. Program for Calculation of Shallow Water Effects on Added Masses of a Three- dimensional Body.....	By Makoto KAN.....	26
15. A Calculation Program of Impact Pressure of Wedge Water Entry Problem by Means of B.E.M.	By Katsuji YAZAWA.....	28
16. Computer Program for Characteristic Calculation of Hydrofoil Section.....	By Takeshi FUWA.....	31
17. A Program for Calculation of Capsizing Motion of a Ship in Manoeuvring in Strong Tidal Current Area	By Akihiro OGAWA.....	34
18. A Program for Calculation of Manoeuvring Motion in Non-uniform Flow	By Akihiro OGAWA.....	35
19. Simulation of Sun Following by Raft Rotation	By Kinji HAMAJIMA & Kenji YAMAKAWA.....	36
20. Program for Calculation of Potential Flow about an Array of Cylinders with Infinite Rows and Lines	By Makoto KAN.....	37
21. A Program for Calculation of Hydrodynamic Forces on Two-dimensional Rectangular Bodies by Potential Continuation Method	By Yutaka OHKAWA.....	40

22. A Program for Motion Calculation of Offshore Floating Structures	By Shunji KATO.....	42
23. A Program for Calculation of Hydrodynamic Forces on Three-dimensional Bodies by Source Distribution Method	By Yutaka OHKAWA.....	46
24. A Program for Two-Dimensional Dynamic Analysis of Forces on Mooring Line by Use of Lumped Mass Method	By Shunji KATO.....	49
25. A Program for Scheduling Activities by Minimizing Waiting Time	By Fujio KANEKO.....	51
26. Thermodynamic Performance of Hydrogen Fueled Internal Reheat Gas Turbine (IRGT)	By Katsuhide HIRAOKA.....	55
27. Program of Dynamic Stress Analysis for a Solid Rotating Disc	By Shigeyasu AMADA.....	57
28. Program of Transient Vibration Analysis of a Beam Subjected to Variable Rotations	By Shigeyasu AMADA.....	58
29. A Program of Heat Conduction Analysis by Boundary Element Method	By Akimasa MACHIDA.....	59
30. Calculation of Bunsen Burner Flame Temperature by Holographic Interferometry	By Seishiro SATO.....	60
31. Calculation of Equilibrium Composition of Burned Gas	By Susumu YAMAGISHI.....	62
32. A Program for Analysis of Steady State in a Once-Through Steam Generator for Integrated Type Marine Water Reactor	By Takeshi MATSUOKA.....	64
33. Data Processing Program for Experimented Data on Natural Circulation in an Integrated Type Marine Reactor	By Takeshi MATSUOKA.....	66
34. "SAMPLE" A Computer Program for Uncertainty Analysis for the Top Event Unavailability on Fault Tree	By Takeshi MATSUOKA.....	68
35. A Code System for Calculating Space Distribution of Radiation Dose Rate Around a Cask	By Hisao YAMAKOSHI.....	69
36. One-dimensional Radiation Transport Code PALLAS-PL, SP-Br	By Kiyoshi TAKEUCHI.....	71
37. Two-dimensional Radiation Transport Code PALLAS-PL, SP-Br	By Kiyoshi TAKEUCHI.....	72
38. A Supplementary Program for Coupling Calculation of Bended Duct Problems by the Two-Dimensional PALLAS Code	By Yasuji KANAI.....	73

1. 等高線図の作画プログラム

推進性能部 菅 井 信 夫

1. プログラムの目的および概要

計測技術の発達によって、多点計測が楽にできるようになると共にそのデータの量は著しく増加する。多点計測結果の解析法の一つに計測された量を等高線図（コンターカーブ）に表わす方法がよく用いられるが、これを手作業で行うと多くの貴重な時間が奪われることになる。これらの作業をコンピュータで処理することは、データ処理の迅速化とともに、作画時の個人差をなくす（反対に、経験から得られた知識が無視される欠点も考えられる）うえからも重要である。

本プログラムは、多点計測されたデータなどから2次元配列のデータに直されたものを入力とし、X-Yプロッタに等高線図を作画するものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称 等高線図の作画

2.2 製作年月 昭和53年3月

2.3 計算の概要

1 cm間隔の2次元配列で入力されたデータは、データ拡張用係数によって補間拡張される。この拡張用係数は、等高線の滑らかさを決めるものであるが通常は2～3で十分である。この拡張されたデータを各区間で近似を行い、指定した等レベルの値の座標を読みとるものである。

2.4 計算の手順

計算の手順は、図-1のフローチャートに示す。

2.5 計算機種および制限事項

FACOM M180-II AD システム

2次元配列のデータの大きさは238である。

3. プログラムの応用

本プログラムは、主としてサブルーチンとして利用されているが、そのいくつかの応用例について述べる。

(1) 船体表面上の圧力、速度等の分布図の作成

当部における使い方の代表的なものであり、作画はBody Plan（正面図）上とprofile上に行っている。

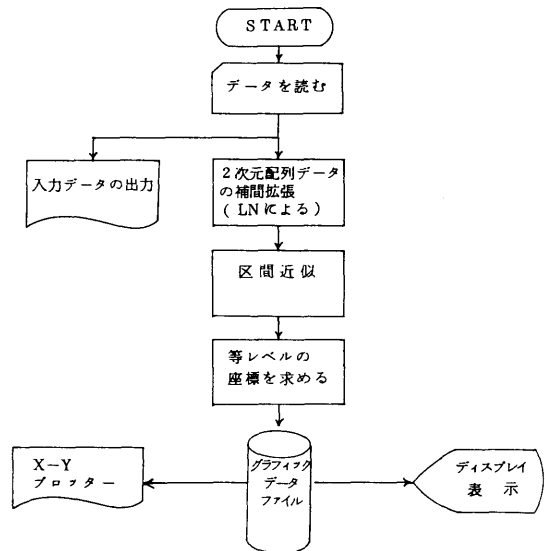


図-1 フローチャート図

(2) 伴流分布図の作成

プロペラ面へ流入する速度分布を表わすものである。

(3) 船側波形、船尾波形の波紋図の作成

これらは計測範囲が広いために現在のプログラム容量では足りないので、いくつかに分けて分割して作図するなどの手法で利用している。

4. あとがき

本プログラムが利用できる状態になってから6年程度経過している。現在プログラムの容量不足、2次元配列データの作成が面倒であることなどの欠点があり、利用に不便が感じられるので今後更に利用しやすいようにプログラムの改良を行いたい。

2. 二次元揚力体周りのポテンシャル流の計算プログラム

推進性能部 児 玉 良 明

1. プログラムの目的および概要

二次元揚力体まわりのポテンシャル流計算法の代表的なものとしては等角写像法があるが、本方法はより直接的な表面特異点分布法である。すなわち物体を多角形で近似し、各辺上に吹き出しと循環の分布を置き、連立一次方程式を解いて解を求める。

等角写像法と比較しての本方法の特徴は、物体形状の自由度が大きいこと、淀み点を翼後縁位置を含めて任意の位置にもってこることができること、そして鏡像効果を解析的に取入れることにより上下壁の影響を考慮することができることである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

「二次元揚力体周りのポテンシャル流の計算」

2.2 製作者

推進性能部 児玉良明

2.3 製作年月

昭和56年7月

2.4 計算の概要

- 基本的には Hess & Smith 法と同じである。
- 物体形状を N 角形で近似。各頂点を $Z_1 \sim Z_N$ で指定する (図1)。

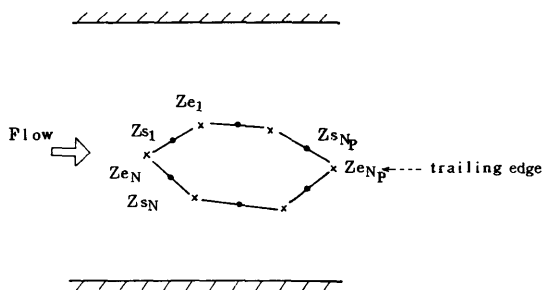


図1 物体形状

- 各辺 (これを element と呼ぶ) にそれぞれ一様強さの source 分布をおく。さらに各辺に共通な強さの

vorticity 分布をおく。すなわち未知数は $(N+1)$ 個。

- 各 element の中点 Z_s (これを control point と呼ぶ) における速度の法線成分がゼロであることを要求する。

さらに, Kutta condition として或る end point Z_{Np} を trailing edge とし, その前後の control point における速度の接線方向成分の大きさが等しいことを要求する。⁽¹⁾⁽²⁾ すなわち条件は $(N+1)$ 個になる。これか

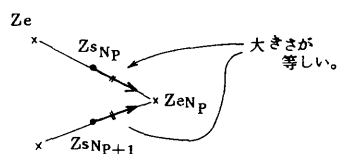


図2 Kutta condition

ら $(N+1)$ 元連立方程式を解いて source 分布と vorticity 分布の強さが求まり, 任意の点での速度が求まる。

- wall effect は図3のように鏡像による効果を無限遠方まで足し合わせることで厳密に考慮している。

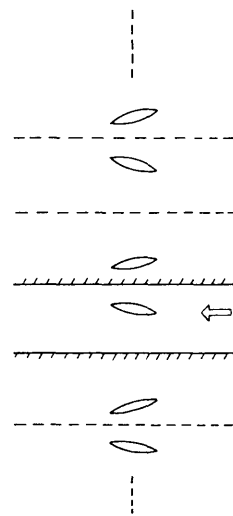


図3 鏡像効果

2.5 計算の手順

計算の手順はフローチャートに示す通りである(図4)。

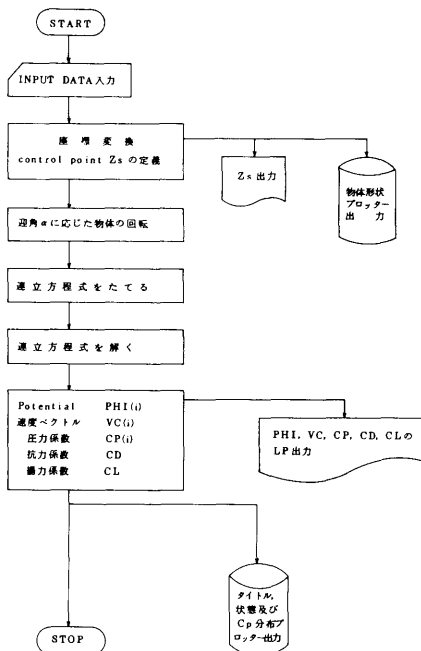


図4 フローチャート

2.6 プログラム用語および計算機種 FÖRTRAN, FACOM M-180 II -AD

3. プログラムの応用

応用例として楕円柱が迎え角 10° で流れの中に置かれている場合のプロッターによる出力結果を示す(図5)。

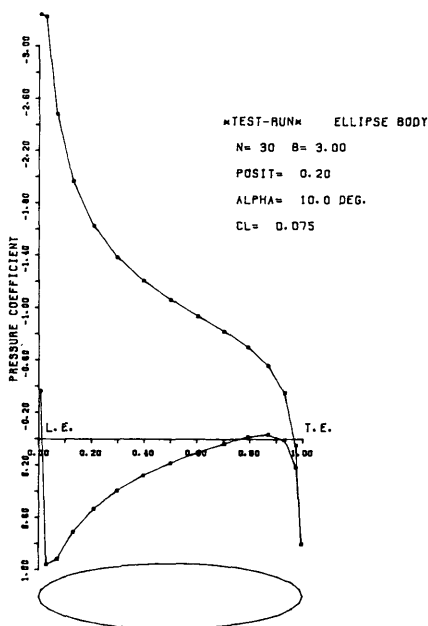


図5 プロッター出力例

4. あとがき

回流水槽等で実験をする場合, ある程度の wall effect は避け難い。その許容限度を評価したり, 計測値を補正したりする上で本プログラムの活用が期待される。

参 考 文 献

Hess, J.H. and Smith, A.M.O.: "Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies" Douglas Aircraft Report No. E.S. 40622. March, 1962.

3. 3次元非揚力体周りのポテンシャル流の計算プログラム

推進性能部 竹 子 春 弥

1. プログラムの目的および概要

船舶, 航空機などの流力特性を調べる時, 最も基本となるのは非圧縮性ポテンシャル流場における特性で

ある。任意の三次元非揚力体周りの非圧縮性ポテンシャル流の計算で現在最も一般的な方法は J.L. Hess and A.M.O. Smith による方法¹⁾である。本プログラムはこの方法に従って, 物体表面を有限個の四辺形面素で

近似し四辺形要素上の特異点分布についての積分方程式を解くことにより、一様流中の三次元物体表面および物体から離れた点での流速成分、圧力係数を求めるものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

三次元非揚力体周りのポテンシャル流の計算
Calculation of Nonlifting Potential Flow
About Arbitrary Three-Dimensional Bodies

2.2 製作者

推進性能部 山口真裕, 足達宏之, 管井信夫,
石坂 純, 竹子春弥, 塚田吉昭

2.3 製作年月

昭和58年3月 第4版

2.4 計算の概要

物体表面上の吹出し分布 $\sigma(q)$ を求めるための積分方程式は図-1 に示す座標系を使うと

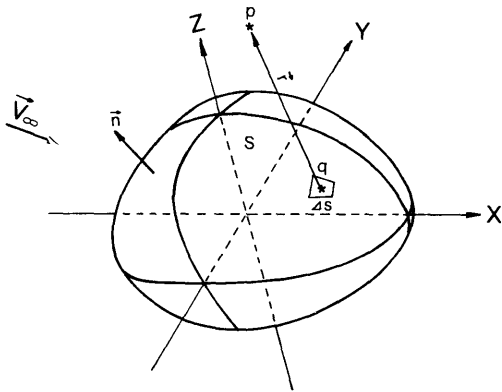


図-1 座 標 系

$$2\pi\sigma(p) - \oint_S \frac{\partial}{\partial n} \left\{ \frac{1}{r(p,q)} \right\} \sigma(q) dS = -\vec{n}(p) \cdot \vec{V}_\infty$$

ただし, $\sigma(p)$ = 点 $p(x, y, z)$ での吹出し密度

$\sigma(q)$ = 点 $q(\xi, \eta, \zeta)$ での吹出し密度

$$r(p, q) = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2}$$

$\vec{n}(p)$ = 点 p における外向き法線ベクトル

$\vec{V}_\infty$ = 一様流速ベクトル

である。物体表面を近似する四辺形面素上では吹出し密度は一定とし、境界条件はその中心点 (Null Point) で満足させる様に積分方程式を線型連立方程式に変形

して吹出し分布 σ について解く。吹出し分布が求まれば、点 p における攪乱速度ポテンシャル φ は

$$\varphi(x, y, z) = \oint_S \frac{\sigma(q)}{r(p, q)} dS$$

より計算でき、各方向の微分によって速度成分が求まる。

2.5 計算の手順

計算の手順は概略図-2のフローチャートに示すとおりである。

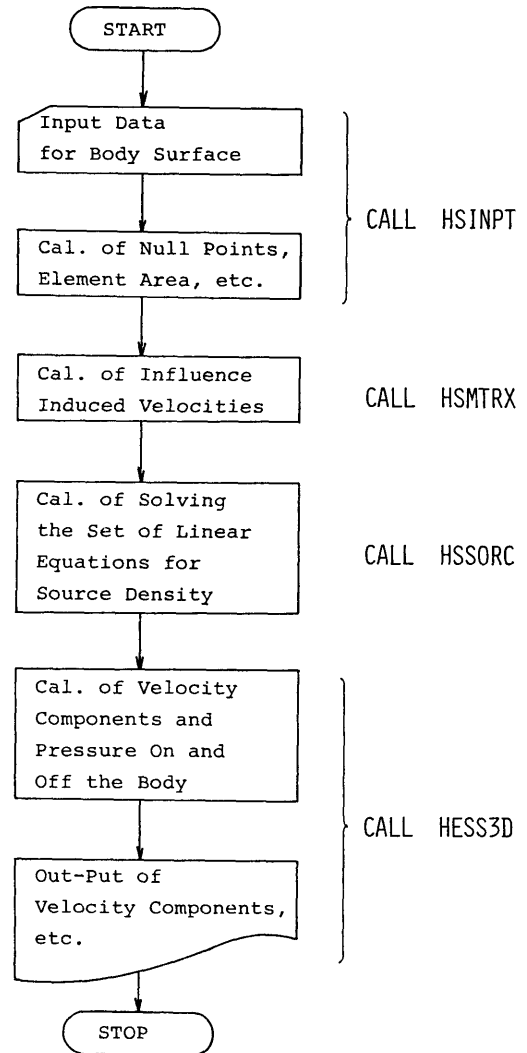


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

第1版がFACOM, 第2, 3版がTOSBAC系の機種用のものであったため, 多少の修正により一般の機種にかかる。現在の第4版はFACOM OS/IVシステムのFORTRAN 77用のものである。計算に必要なメモリ数は, 物体の分割数(現在700又は1500以下)により異なるが, 通常約600KBである。周辺機機としては, TSS端末又はカードリーダ, ラインプリンタ, パーマネントファイルが必要である。

2.7 計算時間および計算精度

計算時間は物体の分割数のほぼ2乗に比例して増加し, 分割数250程度で約2分である。また計算精度は, 物体の分割数, 分割の仕方, 連立方程式の計算精度等によるが, 球全体を36×36分割して計算した結果では, 分割が適当であれば解析結果と1%以下の誤差範囲で一致する。

3. プログラムの応用

プロペラ面等におけるポテンシャル伴流の計算, 境

界層計算およびプロペラと船体等の干渉などの理論計算の初期値として利用できる。

またもっと一般的にグリーン関数が $\frac{1}{r}$ で表わされるラプラス方程式をNeumann条件のもとで解く境界値問題に適用可能と思われる。

4. あとがき

このプログラムは, 入力データを作るのが多少時間がかかるので, 船体線図のoffsetからの補間自動分割等のサブルーチンを開発中である。また, 使用方法については推進性能部のマニュアル²⁾を参照されたい。

参考文献

- 1) J.L. Hess, A.M.O. Smith; "Calculation of Non-Lifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies", Douglas Aircraft Co., Inc., Report No. E.S. 40622, 1962
- 2) 「船舶流体力学ライブラリ SHSL 使用説明書」, 推進性能部資料, 1983年

4. 3次元乱流境界層第一近似解を用いた公称伴流係数の推定プログラム

推進性能部 石坂 純

1. プログラムの目的および概要

船尾形状の初期設計の段階で公称伴流係数の値を知りたい時がある。本プログラムは, 渦なしの条件の下で計画船型の公称伴流係数を推定することができる。

本プログラムでは, あらかじめ船体表面上およびプロペラ面内でのポテンシャル流速分布が与えられていなければならない。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

3次元乱流境界層第一近似解を用いた公称伴流係数の推定プログラム

2.2 製作者

推進性能部 石坂 純

2.3 製作年月

昭和56年8月

2.4 計算の概要

公称伴流係数(W_N)をポテンシャル伴流係数(W_P)と摩擦伴流係数(W_F)を使って

$$W_N = W_P + W_F \quad (1)$$

と表わす。 W_P はプロペラ面内のポテンシャル流速の x 方向成分を使って求められる。 W_F はポテンシャル流線上の速度 u_s , 境界層の排除厚さ δ^* およびプロペラ面積 S を使って次式の様に表わすことができる。

$$W_F = \frac{2}{S} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{u_s}{U_\infty} \delta^* d\zeta \quad (2)$$

ここに U_∞ は無限前方の一樣流速であり, ζ は図-1に示す流線座標である。

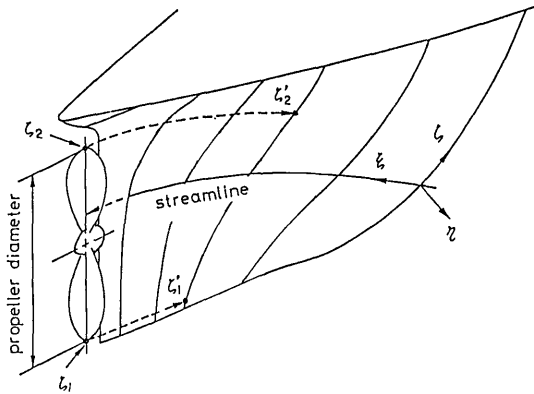


図-1 座 標 系

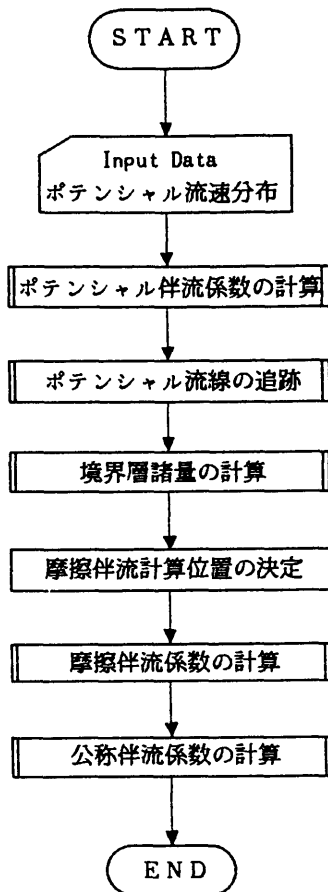


図-2 フロチャート

(2)式はプロペラ位置での計算であって、流線追跡上の問題および境界層解の発散が考えられることから有意な値を得ることはできない。本プログラムでは、プロペラ位置の代りに前方の境界層解が発散しないと考えられる位置で計算を行なう。すなわち、

$$W_F = \frac{8}{\pi (\zeta_2' - \zeta_1')^2} \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \frac{u_s^*}{U_\infty} \delta^* d\zeta \quad (3)$$

として計算を行なう。添字'は計算位置でのそれぞれの値を意味する。 ζ_1, ζ_2 はそれぞれ流線に沿って移動した値である。

2.5 計算の手順

計算の手順は図-2のフローチャートに示す。

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、計算センターの FACOM-M180 II 用に製作したものである。科学用サブルーチンライブラリから B-Spline 補間式を用いている。使用メモリは672KBである。

3. プログラムの応用

本プログラムは、3次元乱流境界層第一近似解を用いているが、さらに高次の境界層計算プログラムへの応用も可能である。

あ と が き

渦なしの場合の公称伴流係数を推定するプログラムを作成した。本プログラムを縦渦の小さいV型船尾船型に適用した結果は実験値と良い一致を示している。しかし、縦渦の大きいU型船尾船型では実験値よりも小さい値を示しており何らかの修正が必要である。

参 考 文 献

1. 石坂 純：3次元乱流境界層第一近似解を用いた公称伴流係数の一試算，船舶技術研究所報告第19巻4号，昭和57年7月

5. 小型船などの安全評価のための航走波計算プログラム

推進性能部 神 蔵 輝 男

1. プログラムの目的および概要

航走中の船舶の近傍にある小舟および作業船は、航走船舶の曳波を受けて危険な状態になる場合が少なくない。この問題をシミュレートする目的で、次の状況を設定した。複数の大型船が所定の位置より任意の方向に一定の速度で航走中のとき、原点に位置する小舟も任意の方向に方位をとりつつ微速で移動しているものとする。このとき本プログラムでは、この小舟が一定時間内に経験する波高、波傾斜、危険範囲の判定と、複数の大型船の小舟に対する相対位置等を計算する。尚大型船の船型は、流体力学上の特異点分布を示す係数によって表示して計算している。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Calculation of the Influence of Ship Running Waves

2.2 製作者

推進性能部 足達 宏之

2.3 製作年月

昭和50年2月

2.4 計算の概要

(1) 大型船と小舟の相対位置の計算

時間 $t = 0$ に n 隻の大型船が所定の位置 (X_0, Y_0) を北より β_n° の方向にとつて $U_n(u, v)$ で航走中である。同時に原点に位置する小舟は北より α° の方位に微速 $U_0(u, v)$ で移動中であるとき、小舟が時間 t_1 より t_2 までの間移動しているときの大型船と小舟の相対位置を求める。

(2) 波高計算

基本的には漸近表示式を用いることとし、大型船の船首を原点と考え、小舟の中心までの距離を $R (> 0)$ とし、大型船と小舟のなす角度 Θ を図-1のように定義すると大型船より小舟の中心における波高 $\zeta(R, \Theta)$ は、次式のように示すことが出来る。

7

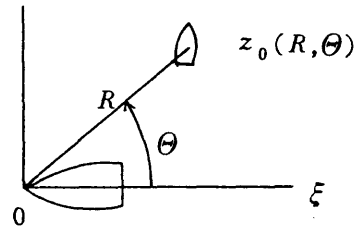


図-1 大型船と小舟の位置

$$\zeta(R, \theta) =$$

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} S_F(\theta) \cdot \sin |K_0 \cdot R \cdot \sec^2 \theta \cdot \cos(\theta - \theta)| d\theta \dots \dots \dots (1)$$

ここで $S_F(\theta)$ は振幅関数で、船体形状により定まり K_0 は次式で定義される。

$$K_0 = \frac{g}{U^2} \dots \dots \dots (2)$$

(3) 振幅関数 $S_F(\theta)$ の計算

船型表示係数表 (offset) から船型に対応する無次元特異点分布係数 $\bar{a}_{nm}$ が求められたとし、また波高を Sine Wave のみを考えることにすると、振幅関数 $S_F(\theta)$ は次式で求めることができる。

$$S_F(\theta) = \frac{l}{\pi} \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \bar{a}_{nm} \cdot \frac{(-1)^m}{m!} \cdot \frac{1}{(K_0 \cdot l \cdot \sec^2 \theta)^{m-1}} |1 - e^{-k_0 l \sec^2 \theta}|$$

$$\sum_{r=0}^m \frac{(K_0 l \sec^2 \theta)^{m-r}}{(m-r)!} \left\{ \sum_{u=1}^{\left[\frac{n+2}{2} \right]} (-1)^u \right.$$

$$\times \frac{n!}{(n-2u+2)!} \cdot \frac{1}{(K_0 l \cdot \sec \theta)^{2u}} \dots \dots \dots (3)$$

g ; 重力加速度

l ; $L/2$ 船の半分の長さ

t ; 船の平均喫水

$\bar{a}_{nm}$; 無次元特異点分布係数

$\bar{\sigma}(\xi, \zeta)$ を無次元特異点分布とすると、次の式で定義される。

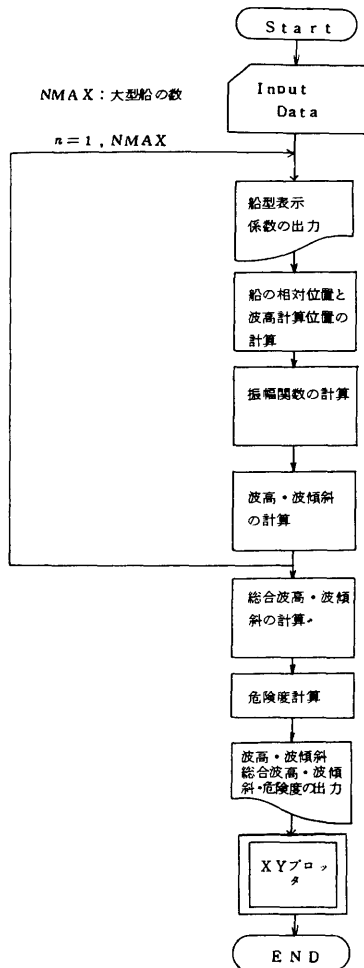


図-2 フローチャート

$$\bar{\sigma}(\xi, \zeta) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M \bar{a}_{nm} \xi^n \zeta^m \dots\dots\dots(4)$$

(4) 危険範囲の判定について

総合波高が求められたとき、見かけの会合周期を求めて小舟の横揺周期、横傾斜、縦傾斜等と比較判定しその時の総合点を求めることによって、危険度を判定する一つの情報を与える。

2.5 計算手順

図-2のフローチャートによって示す。

2.6 計算機種等

FORTRAN, FACOM M180 II AD, X-Y プロッタ

3. プログラムの応用

本プログラムは、大型船の航走波による事故解析等に適用できる。また、航走波の伝播の仕方も推定することができるので港湾の設計などにも利用できる。

4. あとがき

本プログラムは、水深が十分深く、海域には海岸、島などの境界がないことを前提とし、すべての船舶は直進しているものとし潮流、風、海洋波の影響はないものとしている。尚、詳細な内容については、参考文献あるいは推進性能部・船舶流体力学ライブラリー使用説明書を参照。

参考文献

「航走波計算プログラム取扱説明書」
日本海難防止協会・航走波研究委員会
日本ビジネスオートメーション(株), 1976

6. 変動圧力波形の Fourier 解析プログラム

推進性能部 岡 本 三千朗

1. プログラムの目的および概要

船用プロペラに発生する非定常キャビテーションが船尾振動を増加させる事は従来より知られている。特に船尾形状と装着するプロペラの組み合わせの設計が適

当でない船尾振動により船尾付近の作業環境が著しく悪化する。極端な場合には、船尾に亀裂が発生することもあり、安全上からも問題となる。非定常キャビテーションによる船尾振動増加の現象を究明するには模型船のプロペラ周りの船体表面に取り付けた半導体

圧力計から得られる変動圧力波形をフーリエ解析して作動中のプロペラの Blade Frequency に対する周波数分析結果を検討しておく必要がある。

本プログラムは Analogue MT から A/D 変換作業を施して作った Digital MT を使ってプロペラ 1 回転毎の変動圧力波形のフーリエ解析を行うものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Fourier Analysis for Records of Fluctuating pressure

2.2 製作者

推進性能部 岡本三千朗

2.3 製作年月

昭和54年10月

2.4 解析の概要

Digital MT よりプロペラ 1 回転分のデジタルデータを読み込み、これを基本波形としてフーリエ解析を行い、また基本波形内での最大振幅等の検索も行って解析結果を図面化する。

変動圧力の基本波形は次式で近似され、

$$y = a_0/2 + \sum_{i=1}^N |a_i \cos(i\theta) + b_i \sin(i\theta)|$$

$$= a_0/2 + \sum_{i=1}^N \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \cos(i\theta - \varphi)$$

ただし

$$a_0 = 1/n \cdot \sum_{m=0}^{n-1} y_m$$

$$a_i = \begin{cases} 2/n \cdot \sum_{m=0}^{n-1} y_m \cos(im2\pi/n) & \text{for } i \neq n/2 \\ 1/n \cdot \sum_{m=0}^{n-1} y_m \cos(n\pi) & i = n/2 \end{cases}$$

$$b_i = \begin{cases} 2/n \cdot \sum_{m=0}^{n-1} y_m \sin(im2\pi/n) & \text{for } i \neq n/2 \\ 0 & i = n/2 \end{cases}$$

N : 必要とする Blade Frequency の次数の整数倍

y_m : 観測値

φ : 位相 ($\tan^{-1} b_i/a_i$)

n : サンプル数

Blade Frequency の次数を含む次数毎に係数、振幅、位相、最大振幅等が算出される。

2.5 計算の手順

計算の手順は図 1 のフローチャートに示す通りである。

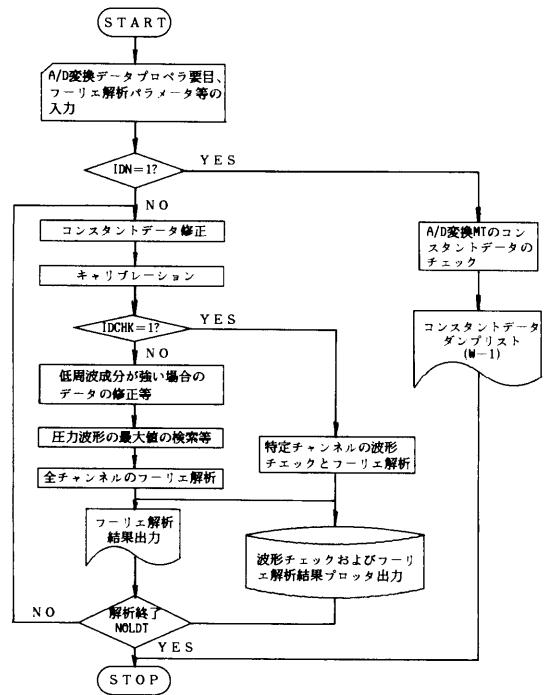


図-1 フローチャート

2.6 計算機および制限事項

1) 用語: FÖRTRAN

機種: FACOM M 180 II AD および DA-TAC-2000

2) A/D 変換は DATAC-2000 の性能より精度が 9bit (± 256 step, 1bit/40mV) なので、フルスケール ± 10.2 V となるように電圧調整を行う。

3) 一度に処理できる入力チャンネル数は 13 チャンネルまでである。

4) サンプル形式は sequential に行う。

5) サンプル速度は最大 20 KHz, またチャンネルあたりのサンプル個数はチャンネル数, Blade Frequency ($f_B = N_F \cdot Z$, N_F : プロペラ回転数, Z : 翼数) で増減する。

) One Record length は 2400 Byte (1200 データ) で、9 bit/データである。

- 7) 基本波形を採り出すために使用するパルスのレベルは揃っていることが望ましい。

3. プログラムの応用

本プログラムは単にデジタルデータのチャンネル毎の割り振り作業を行った後、各チャンネル毎に最小自乗法によるキャリブレーション定数の算出、またある個数のデジタルデータを基に最大値の検索とフーリエ解析を行い、結果をXYプロッタ等に作画するだけなので、1 KHz 程度までの振動現象の周波数分析を対象とするものなら変数名を変えるだけで使用できる。

4. プログラムの検定等

4.1 計算精度および誤差

2.6 計算機および制限事項を参照。

4.2 計算所要時間

10周期分の変動波形の解析を行ってその平均値を出す場合で約50秒程度。

ただしX・Yプロッタ等に結果を作図するルーチンは外して行う。

5. あとがき

フーリエ逆変換を行って解析が正しいことをチェックするルーチンはテストデータで確認したので省略してある。また最近ではパソコンの普及により表題等の作業はパソコン用A/D変換器でデジタル化されたデータを直接処理して行われるが、Digital MTの代わりにパソコンから送り込まれたデータを使っても解析できるように組替えるつもりである。

参 考 文 献

- 1) DATAC-2000 (PB) 高速データ集録装置取扱説明書, 岩崎通信機K. K.
- 2) FACOM OSIV/F 4 DATAC-2000A/DP-4000用磁気テープ入出力ルーチン外部仕様 FACOM HITAC K.K.
- 3) 標準試験法 第2分冊 9 波形解析法 推進性能部
- 4) 岩波講座 基礎工学 4 数値解析 II
- 5) FACOM OSIV GDP 使用手引書, 1970 富士通K. K.

7. 2重反転プロペラの設計及び性能計算プログラム

推進性能部 門 井 弘 行

1. プログラムの目的および概要

高効率の期待できる特殊プロペラの一つとして2重反転プロペラがある。しかしその設計は、前後に配置した2個のプロペラ間の相互干渉を考慮する必要があるため、通常の1軸プロペラを設計するほど簡単ではない。本プロペラは Lerbs¹⁾ の induction factor method を基にした Morgan²⁾ の2重反転プロペラの設計法をプログラム化したものである。

設計は最初に前後プロペラそれぞれを相互干渉を無視した equivalent propeller として設計する。その後、前後プロペラ間の相互干渉、前後プロペラ位置の伴流の差違、後方プロペラの後流の縮流効果等の影響を修正した actual propeller を設計する。最後にピッチ、キャンバーにたいして揚力面補正および摩擦修正を施して最終的なプロペラ幾何形状が決定される。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

2重反転プロペラの設計及び性能計算プログラム
The Design of Contra-Rotating Propeller

2.2 製作者

推進性能部 小久保 芳男

2.3 製作年月

昭和49年4月

2.4 計算の概要

I. equivalent propeller の設計

- 1) 与えられた設計条件よりスラスト係数 C_T および C_{Ts} を計算する。また、 C_T によりプロペラの理想効率 η_i を Schultz の図表より求める。
- 2) プロペラの前進角 β 、伴流値 w を基にプロペラの流体力学的ピッチ角 β_i を計算する。

- 3) induction factor を計算し、無次元循環 G^* のフーリエ係数 G_m に関する方程式を解いて G_m^* を求め、この値を用いて軸方向および接線方向の誘導速度 U_A , U_T を計算し、 U_A/U_T が初期値と十分一致するまで繰り返し計算を行う。
- 4) G^* , U_A , U_T が収束したら、スラスト係数 C_{TS}^* を計算し、設計値と十分一致するまで β_i を修正して繰り返し計算を行う。
- 5) C_{TS} が収束したら equivalent propeller の G^* , U_A , U_T の最終値を打ち出す。

II. actual propeller の設計

ここでは干渉速度、前後プロペラの間隔、前後プロペラ位置の伴流の差違、プロペラ後流の縮流効果等の影響を考慮した流体力学的ピッチ角を求めてピッチを決定する。また、キャピテーションを考慮してプロペラ幾何形状を求め、これに揚力面補正、摩擦修正を施し、一對の2重反転プロペラの幾何形状を決定する。

- 1) equivalent propeller の設計で求めた G^* , U_A , U_T を用いて、前後プロペラの誘導速度にたいする相互干渉係数 f_a , g_a , 後流の縮流効果を示す contraction factor δ , 前後プロペラが同一トルクで作動するための circulation factor ξ を計算し、これらを取り入れた流体力学的ピッチ角 β_i を計算する。最初に $(1 + \delta)(1 + \xi) = 1 = M_0$ を初期値として、 δ , ξ を計算し、 $1 - (M_0/M_0) < 0.01$ まで繰り返し計算を行う。 δ , ξ が収束したら、 $\bar{\delta}$, $\bar{\xi}$ を用いて前後プロペラの流体力学的ピッチ角 $(\tan \beta_i)_1$, $(\tan \beta_i)_2$ を計算し、ピッチ比の第1近似値を求める。
- 2) Burrill のキャピテーション判定基準 (SRI の設計線) に基づいてプロペラ翼面積を求め、MAU 型プロペラの標準翼輪郭に倣って半径方向の翼幅分布を、また翼強度計算を行って半径方向の翼厚分布を決定する。
- 3) 循環を基に揚力係数を、また設計条件よりキャピテーション数を計算し、2次元翼型の初生キャピテーション曲線図より各翼素のキャンパー比の第1近似値を求める。
- 4) ピッチ比およびキャンパー比の第1近似値にたいして揚力面補正および摩擦修正を施して、半径方向のピッチ比およびキャンパー比の最終的な分布を決定する。
- 5) 最後に設計点におけるプロペラ特性を計算して設計が終了する。

2.5 計算の手順

計算の手順は、図-1～図-4のフローチャートに示すとおりである。

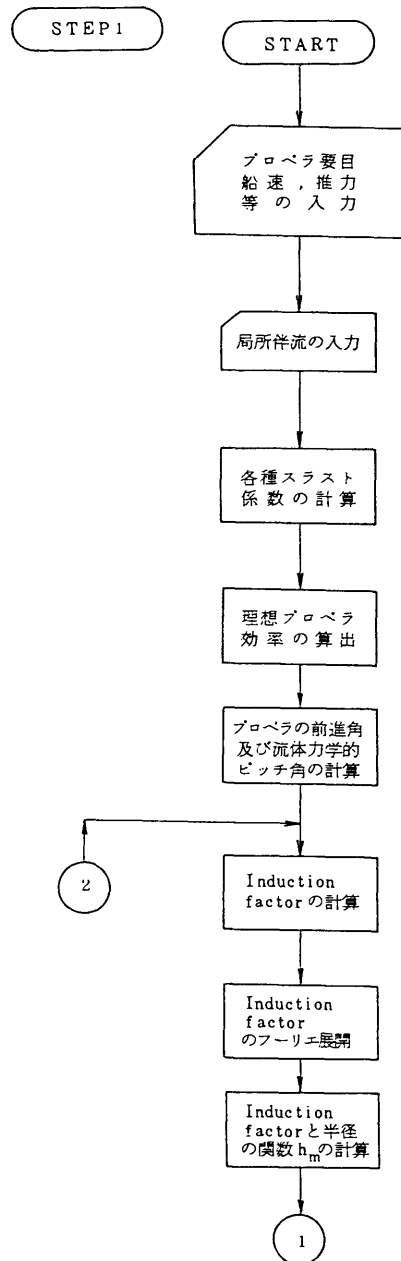


図-1 フロチャート (1-1)

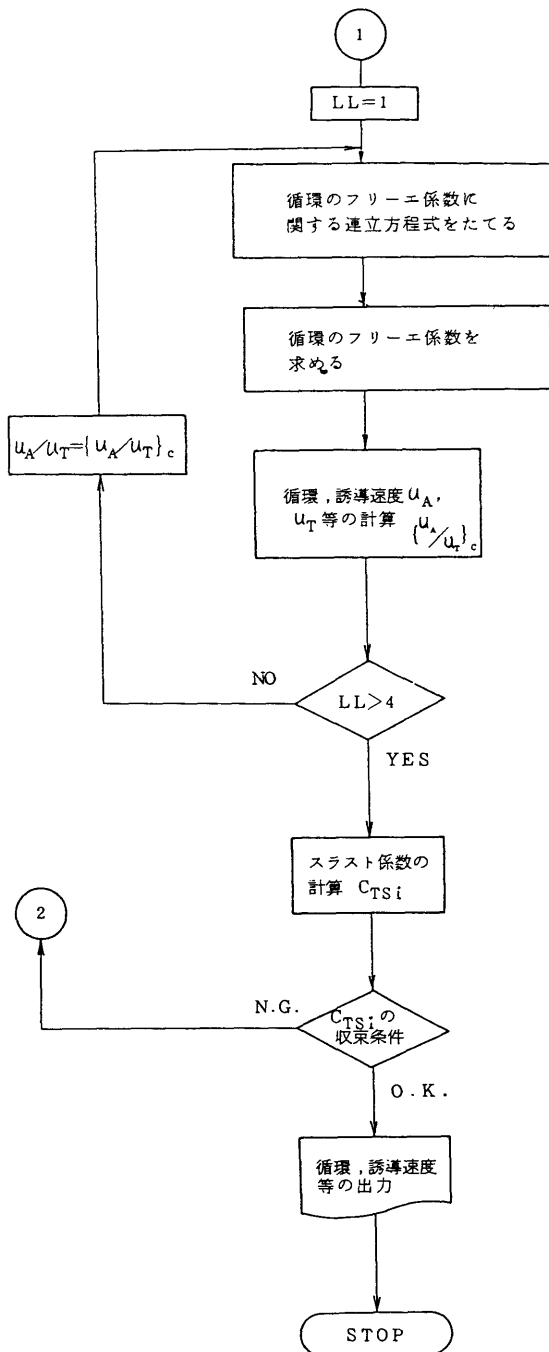


図-2 フロチャート (1-2)

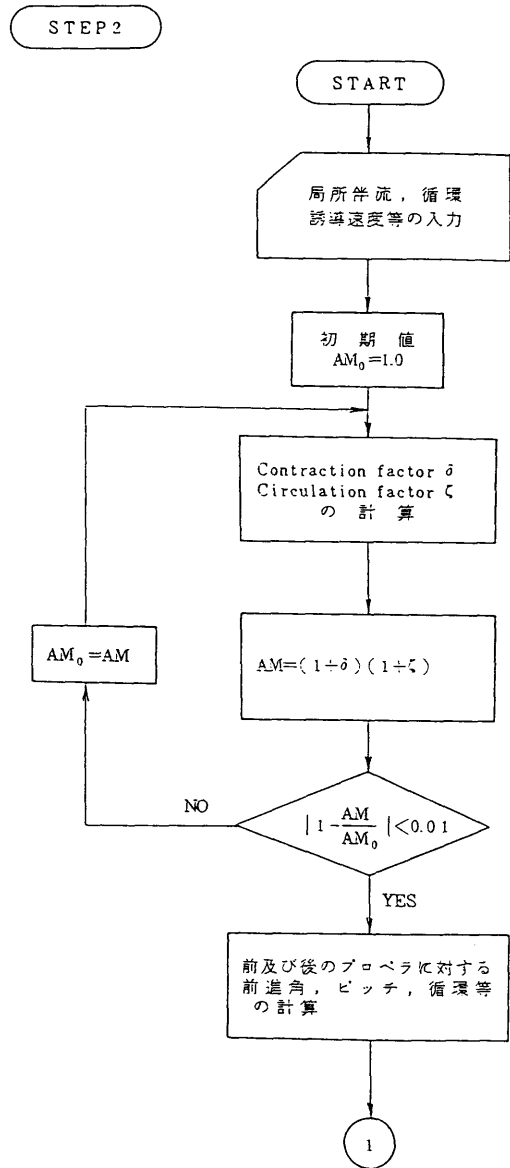


図-3 フロチャート (2-1)

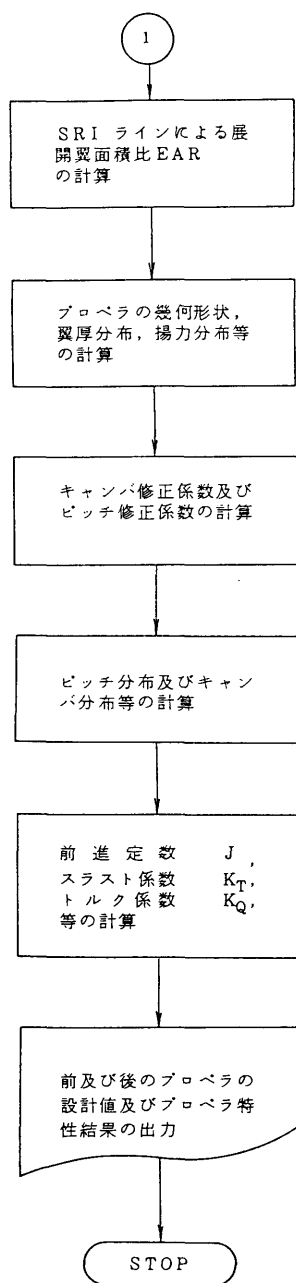


図-4 フローチャート(2-2)

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、49年4月に TOSBAC 5600用に作成されたが、56年8月に FACOM M-180 II AD 用に変換された。

注意事項および制限事項としては、

- 1) STEP 1 (DLPOTE, Equivalent Propeller) では Lerbs の induction factor method を基にした伴流プロペラとして計算を進めている。
- 2) STEP 1 の入力データの E の値は通常1.04で入力する。
- 3) STEP 2 (DLPOTA, Actual Propeller) ではプロペラの翼断面形状は、翼厚分布は NACA 16および66シリーズを、キャンバ分布は $a=0.8$ および 1.0 mean line のものに限定されている。したがって入力データの K K としては、1608, 1610, 6608, 6610のいずれかを指定する。
- 4) 翼輪郭形状は MAU 型プロペラの標準寸法に倣って決定される。
- 5) STEP 2 の入力データの distance-factor ga の値は、文献2) または文献3) の図表を基に作成した cross curve より読みとって入力値とする。

3. プログラムの検定

3.1 計算精度および誤差

精度および誤差に関する検定は行っていない。

3.2 計算所要時間

STEP 1 と STEP 2 を併せて約3分である。

4. プログラムの応用

各種船舶用の2重反転プロペラの設計に使用できる。

5. あとがき

本プログラムによって設計されたプロペラのプロペラ特性を、模型試験によって確認すると、設計条件を十分に満足させない場合もある、設計法の中に実験結果より得られる修正値を導入することにより精度向上をはかる必要がある。

参 考 文 献

- 1) H.W. Lerbs; Moderately Loaded Propeller with a Finite Number of Blades and an Arbitrary Distribution of Circulation, T. of SNAME, Vol. 60, 1952

2) W.B. Morgan; The Design of Contra-rotating Propeller Using Lerb's Theory, T. of SNAME, Vol. 68, 1960

3) A.J. Tachmindji; The Axial Velocity Field of an Optimum Infinitely Bladed Propeller, DTMB Report, NO. 1294, 1959

8. プロペラ単独特性の計算プログラム

(無限翼数プロペラ理論による)

推進性能部 (故)*森 山 文 雄

1. プログラムの目的および概要

プロペラ性能の数値計算については、揚力面理論を取入れた容量の大きな計算が最近実施されるが、船の推進性能を考える場合のプロペラの取扱いは、船体あるいは、舵との相互干渉という形で取扱われるので、プロペラ自体については、計算時間が短く、かつ流体力や近傍の流場が、出来るだけ良好に推定できるモデルが必要である。

このような目的から、従来の無限翼数プロペラ理論を応用したプロペラモデルに、a) プロペラ後方へ流出する自由渦モデルの変更、b) プロペラ性能に影響する物理量をプロペラ半径方向に変化させ、半径方向の単一断面における値で代表させることを極力さけることの2点の改良を加えたプログラムである。

*プログラム製作者に代って上田隆康が本稿を著した。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

プロペラ単独特性の計算 (無限翼数プロペラ理論)
Approximate Calculation Method for Estimating the Propeller Performance by Infinitely Bladed Propeller Theory

2.2 製作者

推進性能部 森山 文雄

2.3 製作年月日

昭和54年7月

2.4 計算の概要

プロペラは面SP上に分布する半径方向に軸をもつ束縛渦 $\Gamma(r, \theta)$ と、それから流出する自由渦で置

換えることができる。自由渦は一定ピッチ (hydraulic pitch) $2\pi h(r)$ をもつ螺旋面を形成するものとする。今、プロペラは θ の負の向きに一定角速度 Ω で回転しながら x 軸に沿って負の方向に一定速度 V で前進しているとき (図-1 参照)、 x , r 及び θ 方向の流速成分を w_{1x} , w_{1r} 及び $w_{1\theta}$ とすると、有限翼数の補正がされた、翼面の位置での速度成分は、

$$w_{1x} = \frac{\Gamma(r, \theta)}{2h(r)k(r, h(r))},$$

$$w_{1r} = 0, \quad w_{1\theta} = \frac{\Gamma(r, \theta)}{2rk(r, h(r))} \quad (1)$$

ただし、

$$k(r, h(r)) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \exp \left\{ N - \left(1 - \frac{r}{r_0} \right) \frac{\sqrt{r_0^2 + h(r)^2}}{2h(r)} \right\} \quad (2)$$

となる。 N は翼数、 r_0 は半径である。

プロペラ面上の x , θ 方向の流速成分を $[V_x]_{SP}$, $[V_\theta]_{SP}$ とすると、

$$[V_x]_{SP} = V + \frac{\Gamma(r, \theta)}{2h(r)k(r, h(r))},$$

$$[V_\theta]_{SP} = r\Omega - \frac{\Gamma(r, \theta)}{2rk(r, h(r))} \quad (3)$$

プロペラ翼面における境界条件は、プロペラ翼面を透過する流れがないという条件と自由渦の流出条件は、流線に沿って自由渦が流出するという条件について前者には、有限翼数であること、及び翼幅が広いことから揚力面理論に対応する補正を加え、後者には、自由渦の流出するピッチ $2\pi h(r)$ を、プロペラ近傍の流場を用いて表わすことにする。

以上の条件の下に $\Gamma(r, \theta)$ が求まると、スラスト Γ , トルク Q は、

$$\begin{aligned}
 T \\
 Q = \rho \int_{r_B}^{r_0} \left\{ 2\pi \Gamma(r, \theta) \times \begin{bmatrix} [V_\theta]_{sp} \\ [V_x]_{sp} \end{bmatrix} \right. \\
 \left. + \frac{1}{2} C_{pb} N_c(r) \sqrt{1 + \frac{h(r)^2}{r^2}} \right. \\
 \left. \times \begin{bmatrix} [V_x]_{sp} [V_\theta]_{sp} \\ [V_\theta]^2_{sp} \end{bmatrix} \right\} r dr \quad (4)
 \end{aligned}$$

で計算される。 r_B はボス半径, C_{pb} はプロペラ翼の粘性係数である。

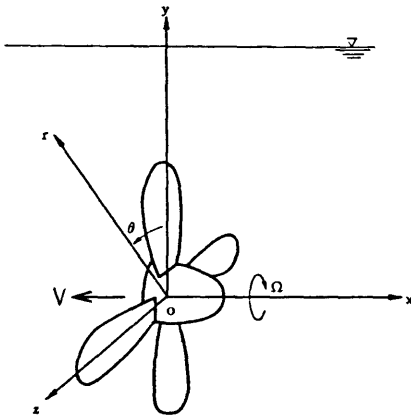


図-1 座標系など

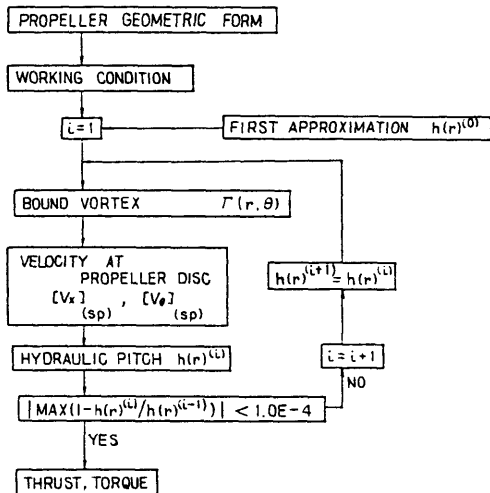


図-2 計算の手順

2.5 計算の手順

図-2に示すフローチャートに従って計算を行う。プロペラ幾何形状及び作動状態を入力すると $h(r)$ を収束パラメータとして繰返し計算を行い、スラストとトルクが出力される。一般にプロペラ面は、 r 及び θ 方向に分割して計算を行うが、単独性能の場合は、半径方向に5分割程度の要素分割を行えばよい。

2.6 計算の機種

FACOM M180 II AD

2.7 入力

- プロペラ主要目—プロペラ直径 $D(m)$, ボス比 x_B , 幾何ピッチ比 p , 展開面積比 a_E , 最大翼幅比 b_{max} , 最大翼厚比 $B. T. R.$, プロペラ翼数 Z
- プロペラ入力断面数 (通常8程度で入力)
- プロペラ形状の入力—入力断面半径比 r/r_0 (図-3参照), r/r_0 における翼幅比 c/c_0 , r/r_0 における翼厚比 t/D
- プロペラ翼型の入力— r/r_0 における前縁から最大翼厚 $t(r)$ 位置までの距離 $C'(r)$ についての $C'(r)/C(r)$ (図-4参照), r/r_0 の前縁における基線から Nose-Tail line までの高さ y_t と y_l についての $y_t(r)/t(r)$ と $y_l(r)$; (図-4参照)。
- プロペラ半径方向要素分割数 (計算出力点数—通常5分割程度でよい)。
- 有効ピッチに対する修正係数

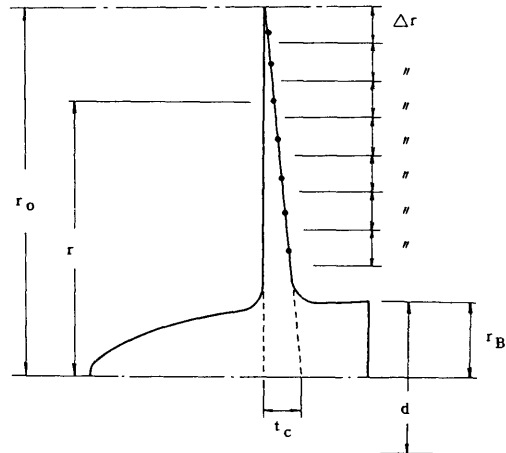


図-3 プロペラ形状

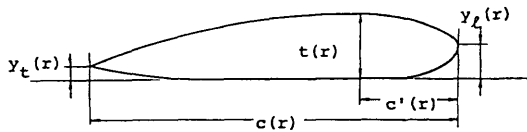


図-4 翼断面形状

2.8 出力

- 入力データの写し（記号も同じ）
- プロペラ面分割実行後のプロペラ幾何形状データ
- プロペラ特性計算結果

前進定数 J , スラスト係数 KT , トルク係数 KQ ,
プロペラ単独効率 $\text{ETA}\bar{O}$, プロペラ面束縛渦分布

G , プロペラ面前進方向流速 $V\bar{O} \times \bar{O}$, プロペラ面
回転方向流速 $V\bar{O}C\bar{O}$, プロペラ面揚力係数 CL ,
Hydraulic Pitch/ $2\pi = H$

3. プログラムの応用

プロペラと船体、舵との相互干渉である推進性能の問題を取扱う上に、プロペラ性能及びプロペラ近傍の流場（特にプロペラ後流）を、過大でない計算時間で高い精度の結果を導く場合に本プログラムの使用が適している。

参 考 文 献

森山文雄, プロペラ性能の近似計算法について, 船研報告第16巻, 第6号, 昭和54年11月。

9. Doublet-Lattice 法によるプロペラ揚力面の計算プログラム

推進性能部 小 山 鴻 一

1. プログラムの目的および概要

不均一流の中で作動するプロペラの流体力学的特性を求める計算プログラムである。プロペラ翼を揚力面として解析している。この種の計算プログラムは、船研において既に開発されているが、その後の電子計算機の高速度化、大型化といった発展および汎用性のある計算プログラムの要求といった時代の趨勢に鑑み新たに開発されたのが本計算プログラムである。揚力面の数値解法には、大きく分けて mode function 法と discrete function 法とがある。既に開発されたプログラムがこの前者の方法の一種によっているのに対し、本プログラムは後者の方法の一種である Doublet-Lattice 法によっている¹⁾。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Calculation of propeller lifting surface by Doublet-Lattice Method

2.2 製作者

推進性能部 小山鴻一

2.3 製作年月

昭和54年3月

2.4 計算の基礎となる理論の概要

翼を薄翼と考え、流れが翼面に沿うという境界条件から翼面の特異点分布を求める。それにはフレッドホルム型の第1種の積分方程式を解かねばならない。それを数値解法で解く。特異点分布が求まると、翼の流体力学特性は容易に計算することができる。

揚力面 S 上の圧力差を Π , 圧力場のポテンシャルを ϕ とすると揚力面上の吹き上げ W は、

$$w(\tau, \mu) = \frac{1}{2\Omega} \int_{-\infty}^{\tau} \frac{\partial \phi(T, \sigma, \mu)}{\partial n} \Big|_{\sigma=\sigma} dT$$

$$\phi(\tau, \sigma, \mu) = \frac{1}{4\pi\rho h} \sum_{n=0}^{l-1} \iint_S$$

$$\Pi(s', r') \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{R} \right) ds' dr'$$

で表わされる。ここに、 τ, σ, μ は螺旋座標、 $2\pi h$ は螺旋のピッチ、 $\partial/\partial n, \partial/\partial n'$ は螺旋面の法線微分、 $\int dT$ は螺旋線に沿った積分である。また、 ρ は流体の密度、 l はプロペラ翼数、 Ω はプロペラの回転角速度 Ω に自由渦の誘導速度成分を加えた値である。上式において、 w の値は境界条件から与えられ、 Π が未知関数である。

本計算法の特徴は、 $\iint_S ds' dr'$ の積分を合理的に離散化し又、解析的に積分を行い、数値積分を $\int_{\tau} dT$ のみにする点にある。すなわち、翼面を多数の box に分割し、box 内の複源の面分布 Π を格子上的線複源で置き換える。そうすると box 内の弦長方向の積分は完了したことになり、更に半径方向の積分は解析的に行うことができる。

結局、上記の積分方程式は連立 1 次方程式に変換され、それを解くことになる。

便宜上、定常揚力面の場合について説明したが、非定常揚力面の場合においても同様の手法で計算式が展開される。

2.5 計算の手順

計算の手順は、図 -1 フローチャートに示すとおりである。

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは TOSBAC-5600 用に製作されたものであり、FACOM M-180 用にも変換されている。使用メモリー数は約 76 KW である。

2.7 入力

(1) プロペラ作動状態

船速、プロペラ回転数およびプロペラ直径

(2) プロペラ翼幾何形状

プロペラ半径、ボス半径、翼数およびプロペラ翼断面形状

(3) 翼断面粘性係数

(4) 伴流分布

軸方向成分及び接線方向成分

(5) 計算標点数

半径方向標点数 ($N_R \leq 15$) 及び弦長方向標点数 ($N_C \leq 10$)

2.8 出力

揚力密度に対応した循環密度、翼素の全循環、推力、トルク等の平均値及び変動値

3. プログラムの検定

3.1 計算精度および誤差

計算精度は、計算標点数 (box の数)、核関数の数値積分精度、hydrodynamic pitch の値等に影響される。数値積分精度は有効数字 5 桁としている。他のプロペラ揚力面計算値との差は翼素の全循環の値で数%程度と考えられる²⁾。

3.2 計算所要時間

計算時間は翼形状や計算標点数によって異なるが

$N_R = 7$, $N_C = 5$ の場合、定常計算で約 4 分、非定常計算一成分約 16 分である。

4. プログラムの使用法について

4.1 オペレート

プログラムの実行は、BATCH 処理による。

4.2 プログラムの応用

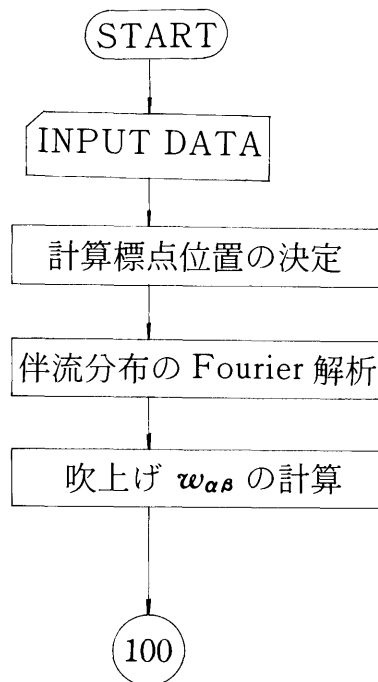
プロペラ特性の定量的な推定に利用される。

5. あとがき

本プログラムは、TOSBAC-5600 用に製作され、数値計算はほとんど $N_R = 7$, $N_C = 5$ の場合について行なわれていた。FACOM M-180 の使用により大マトリックス $N_R = 15$, $N_C = 10$ の場合も計算が容易になるであろう。

参 考 文 献

- 1) 花岡達郎, “プロペラの基礎理論—Ⅲ (discrete loading function によるプロペラ揚力面の二つの解法)” 船研報告, 第 14 巻, 第 6 号, 昭和 52 年 11 月
- 2) K.Koyama, “On Application of the Lifting Surface Theory to Marine Propellers”, 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1980, Tokyo



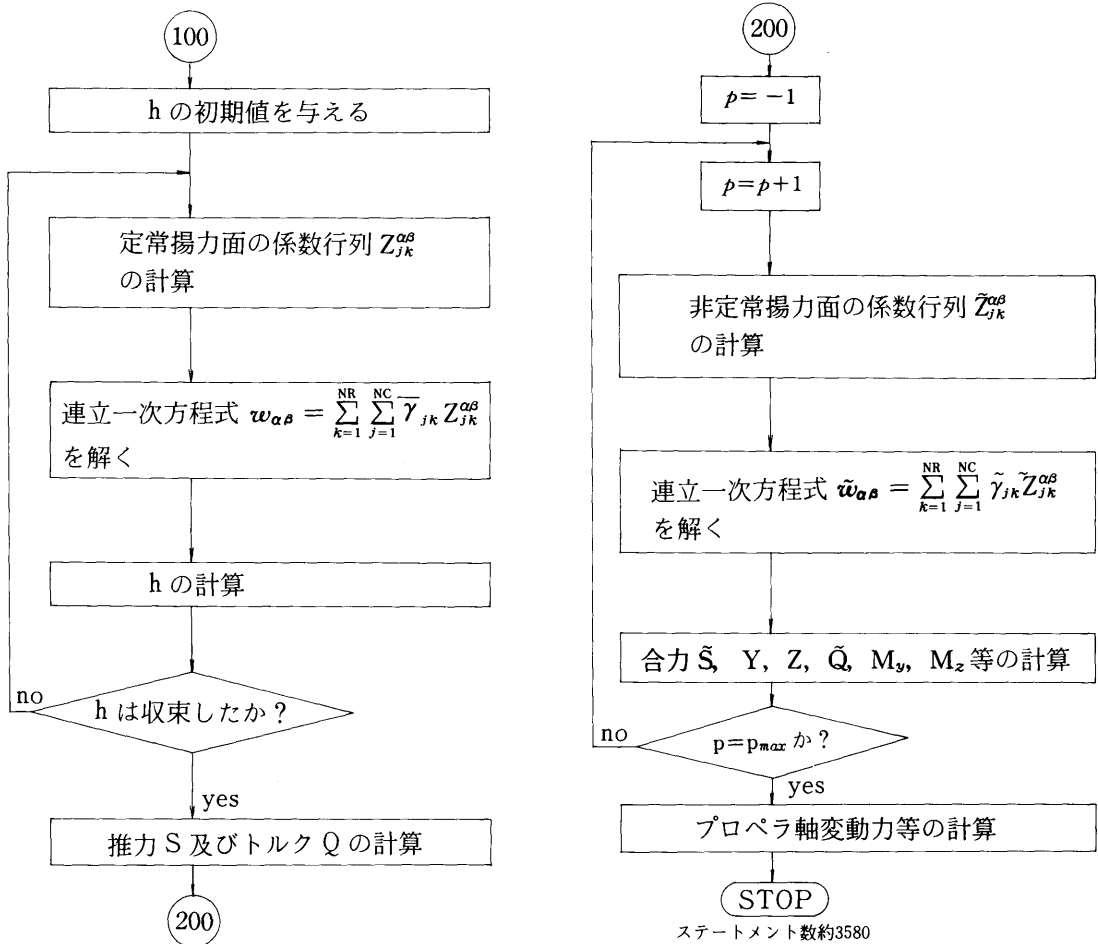


図-1 フローチャート

10. キャビテーション発生範囲の計算プログラム

推進性能部 右 近 良 孝

1. プログラムの目的および概要

船尾伴流中を作動する船用プロペラにどの程度のキャビテーションが発生するか推定することは、船用プロペラ設計上、効率と並び最も重要な問題の一つである。不均一流中を作動する船用プロペラの翼面上の

流場は、小山の核関数展開法による非定常プロペラ揚力面計算プログラムにより、流体力学的に等価な相当二次元翼のそれに置き換えることができる。これに対して、二次元空洞理論およびキャビテーションが発生しても二次元翼の揚力が殆んど変化しない性質を利用した揚力等価法を組み合わせ、キャビティの長さを計

算する。各半径位置でのキャビティ長さをストリップ法的に求めることにより、キャビテーションの発生範囲を得ることができる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Prediction of Cavity Extent on A Marine Propeller Blade Working in Non-uniform Flow

2.2 製作者

推進性能部 右近良孝

2.3 製作年月日

1979年5月(境界層計算なし)

1980年2月(境界層計算あり)

2.4 計算の概要

キャビテーションの発生範囲を計算するためには、各プロペラ翼角度位置及び各半径位置におけるキャビテーション数、有効迎角、有効キャンパー形状ならびに翼厚分布が必要である。相当二次元翼の概念を用いることにより、これらのデータと翼弦長は既存の小山の核関数展開法による非定常プロペラ揚力面計算プログラムにより得られる。この相当二次元翼の圧力分布は等角写像法の一つである守屋の方法により計算する。この結果を用い、Thwaitesの方法により層流境界層を計算し、Curle & Skanの方法により、層流剥離点を求める。層流剥離をしない時は、乱流への遷移点をGranvilleの方法又はSmithの方法により判定する。

層流剥離点での圧力係数 $C_{p_{sep}}$ とキャビテーション数 σ の和が負又は0になったらその点よりシート・キャビテーションが発生するものとする。又、乱流に遷移し、その点での圧力係数 $C_{p_{tran}}$ とキャビテーション数との和が負又は0になったら同様にシートキャビテーションがその点より発生するものと判定する。迎角が小さく圧力係数とキャビテーション数との和が負となる範囲において、層流剥離も乱流遷移もしない時は、その範囲においてバブルキャビテーションが発生すると判定する。これ以外の時はキャビテーションが発生しないと判定する。ここで、相当二次元翼の迎角の絶対値が 1° より小さいか、又は最大翼厚が翼弦長の6%より厚い時には、揚力等価法を用いるが、負圧面において

$$\int_{x_1}^{x_2} (C_p(x) + \sigma) dx = 0$$

となる x_2 を計算し、キャビティ後端して対応する x_1

は層流剥離点又は乱流遷移点であり、 $C_p(x)$ は圧力係数である。

一方、相当二次元翼に対し、閉塞型のキャビティ・モデルによる西山の二次元部分空洞理論を適用すると、与えられたキャビティ長さに対して、キャビテーション数が計算できる。これらの関係を用いて、発生するキャビティの長さを内挿して求める。キャビティの長さが翼弦長の70%を越える場合には、キャビティの長さが翼弦長に一致する時、開放型のキャビティモデルで近似できるので平板翼に対する超空洞理論の結果を用い、

$$\sigma_{cr} = 10 \cdot \alpha$$

なるキャビテーション数を用いて内挿する。空洞理論の結果を適用する範囲は翼厚が翼弦長の4%以下でかつ迎角が 1° 以上とする。

翼厚が4~6%でかつ迎角が 1° 以上の時は両者の平均値をキャビティの長さとする。

2.5 計算の手順

計算の手順はFig. 1のフロー・チャートに示すとおりである。本プログラムは三つの独立したサブプログラムから成り、これらを一つのプログラムとして起動させることも、それぞれ独立に計算することもできる。即ち、キャビテーション発生範囲計算用に修正された核関数展開法による非定常プロペラ揚力面計算プログラムにより得られたキャビテーション発生範囲計算用入力データーを一旦ファイルに収納した後、これを入力として揚力等価法プログラムおよび二次元空洞理論プログラムにより、それぞれキャビティの長さを計算し、迎角、翼厚、および揚力等価法プログラムにおける境界層計算結果よりキャビテーションの発生範囲を決定する。

2.6 計算機種および制限事項

- | | | |
|-------------|-------------------------------|-------------------------|
| (1) プログラム用語 | FORTRAN 77 | |
| (2) 計算機種 | FACOM M-180 II AD | |
| (3) 必要メモリ | 284 KB | |
| (4) 周辺機器 | パーマネント・ファイル
およびテンポラリー・ファイル | |
| (5) 計算時間 | 非定常プロペラ揚力面 | 1分30秒
(船後伴流中、翼角度13点) |
| | 揚力等価法 | 3分(翼角度位置8点) |
| | 二次元空洞理論 | 3分(翼角度位置8点) |

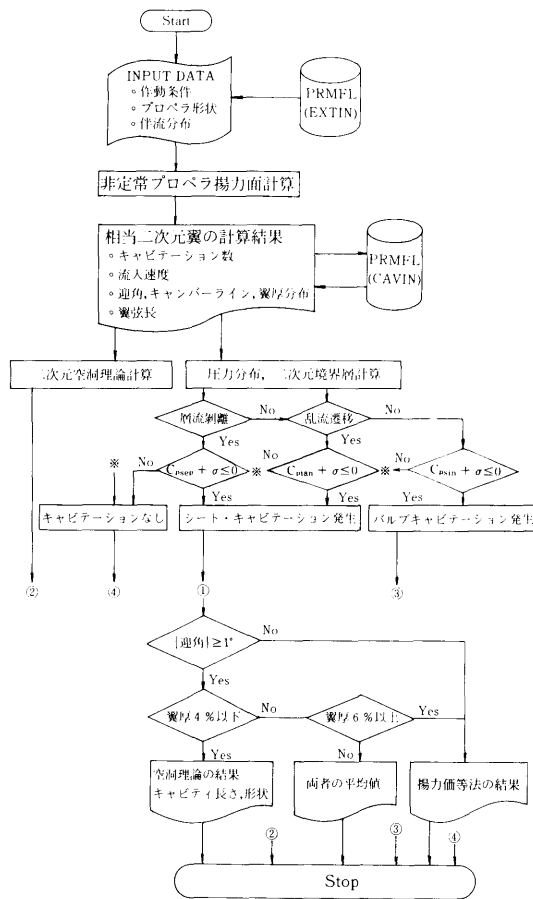


Fig. 1 Flow Chart

3. プログラムの特長およびその応用

本計算プログラムは、小山の核関数展開法に基づく非定常プロペラ揚力面プログラムにより必要な入力データを計算するので、適用範囲は後者により一義的に決められる。本方法ではプロペラ翼面まわりの流場は非定常プロペラ揚力面理論により計算されるが、キャビティの長さは定常理論で計算されるので、キャ

ビテーションの発生遅れは実験結果よりかなり少なくなる。本方法では境界層計算を行っているので、模型プロペラの内側半径位置においてシートキャビテーションが発生しにくくなる。このため各半径位置における実験との対応は良くなる。その他、キャビテーション発生範囲の計算は、strip theory により計算されているので、キャビテーション自身の三次元影響（相互干渉）が無視されていることに留意する必要がある。応用としては本方法によって計算されたキャビテーション発生範囲に基づき、キャビティ・ボリュームを計算することにより、船尾変動圧力の計算を行うことができる。

4. あとがき

本プログラムによる計算結果は、ワイヤメッシュ後方不均一流中の作動する模型プロペラばかりでなく、実船プロペラでのキャビテーションの発生範囲と良好な一致が得られている³⁾。しかしながら、Highly Skewed Propeller のキャビテーション発生範囲を計算する際には、プロペラ揚力面理論も含め、使用にあたって問題があり今後改良する必要がある。

二次元空洞理論計算プログラムでは黒部雄三技官により製作された西山の部分空洞理論計算プログラムが一部修正されて使用されている。

参考文献

- 1) 小山鴻一, “新しい方法によるプロペラ揚力面の数値解析”, 造船学会論文集, 第132号, 1972
- 2) 船舶技術研究所, “船用プログラム特性の計算プログラム (その2)”, 講習会テキスト, 1974
- 3) 加藤洋治, 右近良孝, “プロペラ・キャビテーションの推定法”, 船型設計のための抵抗推進理論シンポジウム, 日本造船学会, 1979
- 4) 右近良孝, “プロペラ・キャビテーションの発生範囲の推定法”, 船研報告, 第16巻, 第6号, 1979
- 5) Ukon, Y.: “Partial Cavitation on Two- and Three-Dimensional Hydrofoils, and Marine Propellers”, Proc. of 10th IAHR Symp., Tokyo, 1980

11. 非線形水面波の伝播及び反射の計算プログラム

共通工学部 富田 宏

1. プログラムの目的及び概要

このプログラムは、浅水域における水面波の挙動を数値的にシミュレートし、その伝播、反射等の特性を明らかにするために開発したものである。その特長は、従来の計算法と異なり、水面での非線形な境界条件を変化する境界面上で評価している点にある。則ち、水面波の非線形な境界条件を厳密に満足する計算法である。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

ソリトンの発生・伝播・反射の計算

2.2 部名 製作者名

共通工学部 富田 宏

2.3 製作年月

昭和57年5月

2.4 計算の概要

計算方法は、境界要素法と数値積分法とを組み合わせたものであり、境界面上における法線方向の速度成分を求めるための積分方程式を境界要素法を用いて解き、得られた境界上各点での速度成分を使って境界上の各水粒子の運動方程式を積分して新しい時刻における境界面を決定する。

用いられた方程式系の概略は次の様である。

法線速度 $V_n = \phi_n$ を定める積分方程式は

$$f_c[\phi(P) \frac{\partial}{\partial n} \ln R(P, Q) - \ln R(P, Q) \phi_n(P)] dP \\ = g(Q) \phi(Q)$$

ここで $R = \overline{PQ}$ C は全ての境界を表わす。

これによって得られた諸量に基いて新しい時刻における境界の形状 $X(x, y)$ 及びポテンシャル ϕ は次の運動方程式を解くことによって得られる。

$$\frac{Dx}{Dt} = x_s \phi_s + y_s \phi_n$$

$$\frac{Dy}{Dt} = y_s \phi_s - x_s \phi_n$$

$$\frac{D\phi}{Dt} = -gy + \frac{1}{2} (\phi_s^2 + \phi_n^2)$$

ここで S は境界に対する接線微分, n は法線微分を意味している。以下これを繰り返すことによって水面波の挙動を追跡することが出来る。

2.5 計算の手順

フローチャートを図-1に示す。

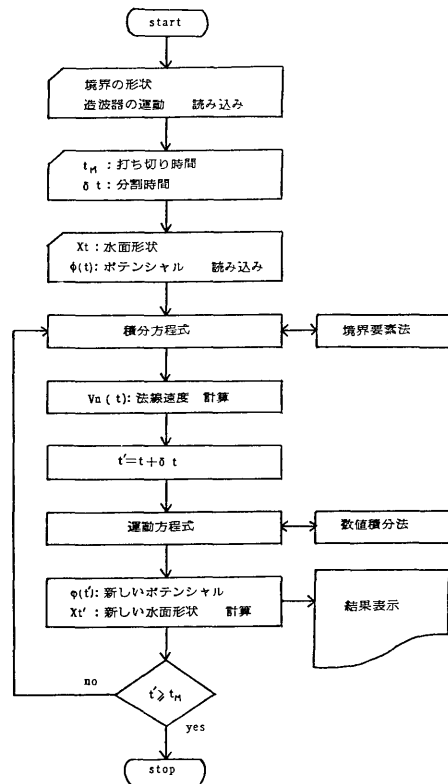


図-1 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは計算センターのFACOM M 180 II ADを用いて計算するため、FÖRTTRAN 77レベルで製作した。科学計算ライブラリーは使用していない。計算は単精度で行って實際上差しかえない。本計算における使用メモリーは約1000 KBであるが、この計算法は同じ問題に対しては他の方法に較べて著しくメモリーが少なくて済むのは一つの特長である。

3. プログラムの応用

製作されたプログラムでは、1次元浅水波の発生、一様水深領域での伝播および、垂直壁による反射のみを取扱い、特にソリトンの発生法について工夫がこらしてある。このプログラムをより広い範囲の問題に適用することは、次の場合には入力データの差し換えのみによって極めて容易に実行出来る。

- A) 任意波の発生
- B) 水深の任意変化
- C) 任意傾斜の斜面による反射
- D) 固定された没水体ないし半没水体の存在する場合
また、十分なメモリがとれる場合には二次元水面に

対する計算、波浪中の浮体の動揺の計算等にと応用することが可能である。

4. あ と が き

当該プログラムによれば、粘性を無視し得る水面波の諸現象を、砕波限界の範囲内であれば、どのようなものでも計算可能である。但し、一般に定常状態を得るには非常に長時間の計算時間を要する場合が多い。

参 考 文 献

- 1) TÖMITA H. K. TANIZAWA (1983)
Numerical Investigation into Nonlinear Water Waves by Means of the Boundary Element Method
Papers of Ship Research Institute No69
- 2) 富田宏 谷沢克治 (1983)
境界要素法による非線形波動の数値実験 その2
日本海洋学会秋季大会講演要旨集
- 3) 富田宏 谷沢克治 (1982)
BEM による有限振幅水面波の数値計算
日本海洋学会秋季大会講演要旨集

12. 波浪中船体の非線形応答のシミュレーションプログラム

運動性能部 渡 辺 巖

1. プログラムの目的および概要

荒天航行中の船舶には種々の原因により波浪外力が作用する。従来、この推定には、外力の大半を占める波浪変動成分に着目した線型計算が使われてきた。しかし船体運動が激しくなり、スラミングが発生するような状況では、線型計算による推定だけでは不十分で、スラミングによる衝撃荷重を正しく推定しなければ波浪外力を正しく把握したことはならない。

このためには、時々刻々の船体の姿勢、波面との相對関係をフォローするシミュレーションの手法が有効である。本プログラムは、いくつか提唱されているシミュレーション手法のうち、山本等によって提唱されている手順に基づいて、波浪中の船体に働く縦曲げ、縦荷重を求めるものである。

本計算の内容を要約すると

主船体構造を、曲げ剛性および重量分布が長手方向に変化する両端自由の Euler 梁を仮定し、これが波浪中で弾性体として外力を受け、運動している時の船体の曲げ変形ならびにそれと等価な荷重を求めるものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Calculation of non-linear responses of main hull structure in waves.

2.2 製作者

運動性能部 渡辺 巖

2.3 製作年月

昭和59年3月

2.4 計算の概要

計算は要約すると、指定された波浪中を航行する船

について時々刻々の船と波面の相対位置関係から船に働く外力を算出し、その時の船の構造応答を数値積分により求めていくことにある。

流体力の計算では、ストリップ法 (OSM) の仮定を踏襲し、各断面毎の流体力を積分して船体全体の流体力としている。また本計算で重要なスラミングによる衝撃的流体力については Karman の式により求めている。

船体構造の応答としては、縦曲げのみに着目しており、その解法としては、空間的にはモード関数を用いた Galerkin 法で、時間方向には Newmark- β 法 ($\beta = 1/4$) を適用して解を求めている。

2.5 計算の手順

計算の概略フローチャートを図 1 に示す。

2.6 計算機種および制限事項

計算には FACOM M-180 II AD を用いており、プログラムステップ数は約 1500 (FORTRAN) 必要メモリー数は 340 KB、計算時間は約 90 秒である。

一部の計算結果は、XY プロッターで出力されるので、その為のパッケージルーチンが必要であるが、それ以外の部分は、ソースプログラムのレベルでは移植性は良い。

3. プログラムの応用

4. あとがき

今後、このプログラムを基礎に、青波打込みに対する船体応答、剪断変形の影響等を考慮したプログラムへの発展を考慮している。

5. 参考文献

- 1) 山本善之, 藤野正隆, 深沢塔一, “非線形性を考慮した波浪中の船体縦運動および縦強度 (第 1 ~ 3 報)”, 造船学会論文集 No143, 144, 145 (1978, 1979)

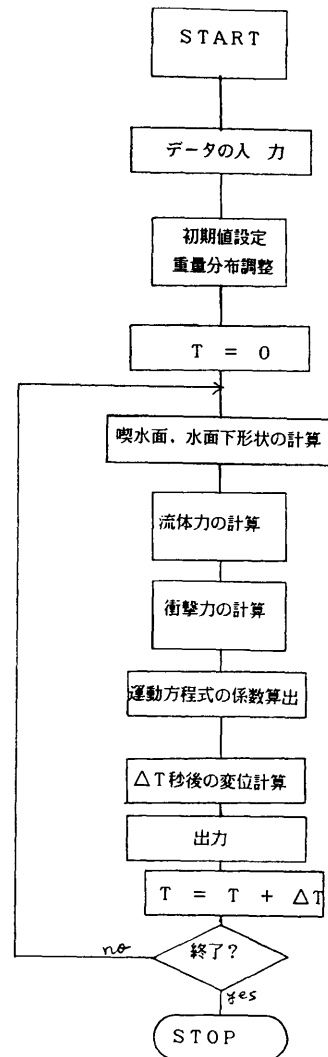


図-1 フローチャート

13. 2次元浅水動揺流体力に及ぼす海底形状影響の 計算プログラム

運動性能部 菅 信

1. プログラムの目的および概要

海底が平坦でなく、岩礁のような形状の凹凸がある浅水域においては、浮体と海底の凹凸との干渉が問題

になる場合がある。このような浅水域において2次元物体が上下揺、左右揺、横揺の各モードで正弦的な運動をしているときの線形造波ポテンシャル流場を、物体表面および海底凹凸部表面上の速度ポテンシャルに関する積分方程式を数値的に解くことによって求め、浮体に作用する流体力（附加質量と減衰力係数）、左右への非対称な発散波振巾比、左右からの波による非対称な波強制力、透過係数と反射係数ならびに浮体による最大波エネルギー吸収効率等を計算するためのプログラムである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

2次元浅水動揺流体力に及ぼす海底形状影響の計算プログラム

Oscillation of an Arbitrary Cylinder in Shallow Water with Arbitrary Bottom

2.2 製作者

運動性能部 菅 信

2.3 製作年月

昭和54年9月

2.4 計算の概要

図-1のように座標系をとり、速度ポテンシャルを $\phi(x, y)e^{i\nu t}$ の実数部で表わす。浮体表面Hおよび海底の凹凸部表面Bの上の $\phi(x, y)$ を決める積分方程式は次のように書ける。

$$\begin{aligned} \phi(x, y) + \frac{1}{\pi} \int_{H+B} \phi(x', y') G(x, y; x', y') ds \\ = \frac{1}{\pi} \int_H \phi_n(x', y') G(x, y; x', y') ds \end{aligned} \quad (1)$$

グリーン関数 $G(x, y; x', y')$ としては、主に(2)の積分表示型のものを使うが $|x - x'|$ が大きいときは(3)の級数表示型のものを使って計算時間を節約している。

$$\begin{aligned} G(x, y; x', y') = \ln r_0/h + \ln r_2/h \\ e^{-kh} \cosh k(h-y) \cdot \cosh \\ -2 \int_0^\infty \left\{ \frac{k+K}{k} \cdot \frac{k(h-y') \cos k(x-x')}{k \sinh kh - K \cosh kh} \right. \\ \left. + \frac{e^{-kh}}{k} \right\} dk \quad \{ \dots (2) \\ + i2\pi \frac{K_0 + K}{K_0} \cdot \frac{\cos K_0(x-x')}{Kh + \sinh^2 K_0 h} \end{aligned}$$

(222)

$$\begin{aligned} e^{-K_0 h} \sinh K_0 h \cdot \cosh K_0 \\ (h-y) \cdot \cosh K_0(h-y') \cdot \end{aligned}$$

$$\text{但し } K = K_0 \tanh K_0 h, K = \frac{\nu^2}{g} \cdot \frac{B}{2},$$

$$r_0 = [(x-x')^2 + (y-y')^2]^{1/2},$$

$$r^2 = [(x-x')^2 + (y+y'-2h)^2]^{1/2}$$

$$G(x, y; x', y')$$

$$= i \frac{2\pi}{K_0} \cdot \frac{K_0^2 - K^2}{hK_0^2 - hK^2 + K} \cosh K_0$$

$$(h-y) \cdot \cosh K_0(h-y') \cdot e^{-iK_0(x-x')} \quad \{ \dots (3) \}$$

$$- \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\pi}{m_k} \cdot \frac{m_k^2 + K^2}{h m_k^2 + h K^2 - K} \cos m_k$$

$$(h-y) \cdot \cos m_k(h-y') e^{-m_k(x-x')}$$

$$\text{但し } K = -m_k \tan m_k h$$

また(1)において法線の方向は境界から流体内部へ向う方向を正としている。

積分方程式(1)の数値解は、浮体表面および海底凹凸部表面を図-1に示すように分割し、各微小線素の上では速度ポテンシャルは一定であるとして階段状の分布を求めるものである。筆者がこれまでこの種の問題を解く際に用いている手法は、特異性を完全に処理することによって連続分布を許し少ない分割数で高精度を得るものであるが、今回は境界形状の任意性を許したためにこの手法は採用しなかった。

速度ポテンシャルが求まったあとは、圧力分布、浮体に作用する各種の力（各運動モード間の連成を含む附加質量と減衰力）、左右非対称に放射する波（発散波）の振巾と位相、Kochin 関数等が計算される。更に Diffraction 問題と Radiation 問題を結びつける Haskind の関係などを使うことによって右からの入射波、左からの入射波によるそれぞれの場合の波浪強制力の各成分、透過係数、反射係数、或いは、この浮体が吸収できる波エネルギーの理論的な最大値である最大波エネルギー吸収効率等を計算している。

2.5 計算の手順

計算の手順は図-2のフローチャートに示す通りである。

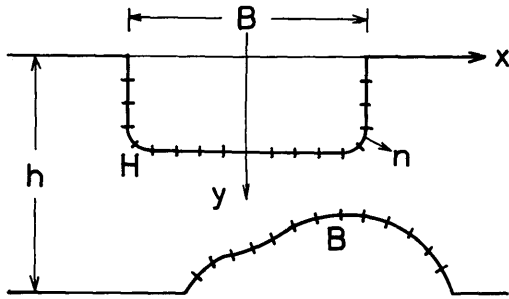


図-1 座標系

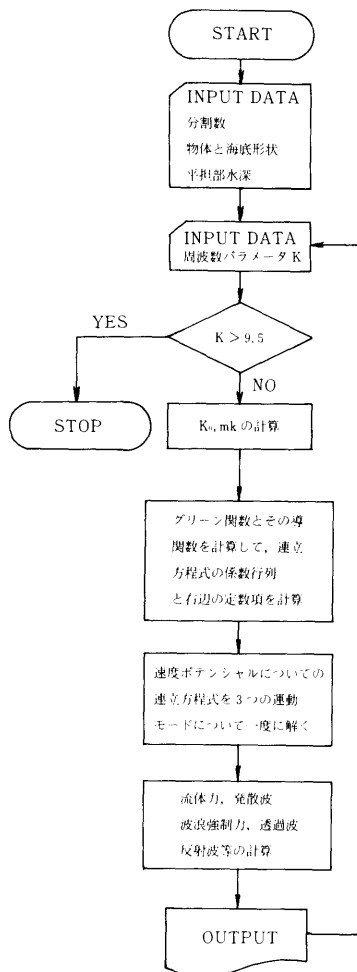


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、当所中央計算機室の FACOM M-180 II AD 用に製作したものである。システムに組み込まれている科学用サブルーチンライブラリの中の指数積分、正弦・余弦積分及びガウス・ルジャンドル数値積分、ガウス消去法による連立一次方程式のサブルーチンを使用しているため、それらの名前と引数に注意すれば他機種への移行は容易である。

使用メモリ数は、物体表面と海底凹凸部表面の分割数の合計を250まで許した場合には約1150KBであるが、分割数の合計を100までに制限すると約320KBでおさまる。

外部記憶装置は使用していない。

3. プログラムの応用

本プログラムは、海底に凹凸がある場合の浮体の定常動揺に関する2次元線形造波ポテンシャル問題を解く、かなり汎用性のあるものである。海底が平坦な場合は、海底形状を入力しなければよいが、平坦であることを示す入力データを与えても正しい結果を得ることができる。また水深が無大の場合には、水深 h として負の値を与えることにより、更に周波数が0または ∞ の場合にはパラメータ K としてそれぞれ0または9を与えることにより、それぞれの場合のグリーン関数とその微分の計算ルーチンへ跳ぶようになっている、これらの場合を含めた計算が可能である。

但しこのプログラムで計算できない場合が2つあり、1つは、船のビルジキールのような厚さのない板状の場合で、もう1つは、海底形状の凹凸部が平坦部より下にある場合である。筆者は後者を凹底問題と称しているが¹⁾、浚渫航路上の船体動揺の問題などは、本プログラムでは解くことができない。

4. あとがき

2次元浅水動揺流体力等に及ぼす海底形状の影響を計算するプログラムであるが、上述のように凹底問題を解くことができない。この問題は、グリーン関数として $ln r_0$ だけを使う境界要素法 (BEM) を使えば解くことができ、BEMはFEMに比べれば、未知数の数は格段に少ないが、それでも本法のような造波振動吹出しのグリーン関数を使う方法に比べると未知数はまだ多すぎる。従ってグリーン関数として水深無限大の場合の造波振動吹出しの速度ポテンシャルを使うな

として、未知数を減らした BEM の開発をはかる必要があり、浚渫航路付近の船体運動の問題などを実際に解く必要がでてきた段階で取組むこととしたい。

参考文献

- 1) 菅信, 原口富博, 浮体に働く流体力の海底形状影響について, 第40回船舶研究発表会講演集, 1982, 12

14. 3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響の計算プログラム

運動性能部 菅 信

1. プログラムの目的および概要

船のような3次元物体が水面上で正弦的な運動をしているときの流れ場を解くいわゆる造波ポテンシャル問題において, 運動の周波数が0と ∞ の両極限の場合を扱うプログラムである。

浅水域における船の衝突や振動の問題では周波数 ∞ の場合が, また浅水域での船の操縦運動の問題では周波数0の場合がそれぞれ重要であるが, 周波数が有限の場合の造波問題を解く一般的な数値解法では, この両極限の場合を扱えないために, 特別にこの2つの場合に限定して計算するものであり, 楕円体の計算専用のものと実用船型計算用のものと2本別々に作成してある。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

3次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響の計算プログラム

Added Mass of an Ellipsoid in Shallow Water (K = 0 and Infinity)

Added Mass of an Arbitrary 3-D Body in Shallow Water

2.2 製作者

運動性能部 菅 信

2.3 製作年月

昭和58年12月 (楕円体専用プログラム)

昭和59年4月 (実用船型用プログラム)

2.4 計算の概要

図-1に示すような境界条件を満たす流れ場を, 通常の積分方程式法で計算する。使用するグリーン関数は, 図-2に示すような配列で無限に並んだ吹出しと

吸い込みそれぞれの速度ポテンシャルを G^+ , G^- とし, 周波数0と ∞ に対するグリーン関数をそれぞれ G_0 , G_∞ とすると

$$G_0 = G^+ - G^-, G_\infty = G^+ + G^- \quad (1)$$

である。但し

$$G^\pm = \mp \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z \mp z' - 4nh)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z \pm z' \mp 2h - 4nh)^2}} \right\} \pm \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{1}{|2nh|} \quad (2)$$

である。 Σ' は $n=0$ を除く総和を表わし級数の発散部分を打消すために付加する定数項である。

流れ場を表わす速度ポテンシャル ϕ に関する積分方程式は

$$\phi(p) + \frac{1}{2\pi} \iint_s \phi(Q) G_n(P, Q) ds(Q) = \frac{1}{2\pi} \iint_s \phi_n(Q) G(P, Q) ds(Q) \quad (3)$$

であり, これを数値的に解く。

微小面素 ds は原則として4つの端点を与えて決めるが, 物体の前後端などの特殊なところでは3点しか与えられず例外的に3角形で表わす場合もある。微小面素 ds の法線の方向余弦は4つの端点の対角ベクトルの外積で計算する。 ϕ , ϕ_n , G , G_n はいずれも ds 上で一定とし, G とその微分値は, ds を囲む4つの端点における値の平均値をとる。 ϕ と ϕ_n は ds の重心で計算するものとする。但し, 求めようとする ϕ が所属する面素からの影響を他の面素と同様に4つの端点からの影響の平均としてしまうと $1/r(r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2})$ の項について

必ず小さく見積ってしまうことになるので、 $1/r$ の項だけについては、重心と端点の中心をとりその点からの影響の平均をとるというようにしている。

楕円体専用のプログラムでは、楕円体を解析的に表わし ds および法線の方法余弦を解析的に求めている。

積分方程式の数値解が求まったあと、6自由度の運動について連成項を含めた附加質量（附加慣性モーメントを含む）を計算する。

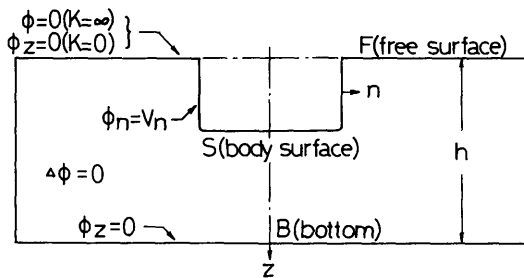


図-1 座標系と境界条件

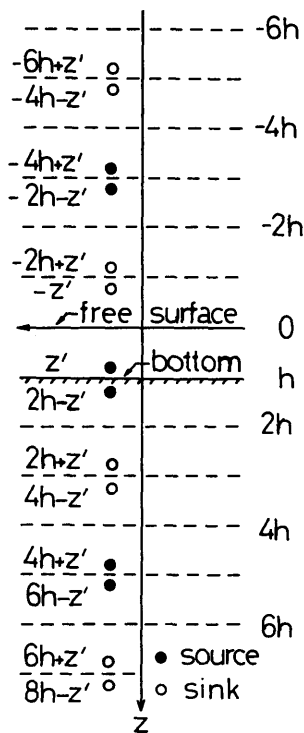


図-2 鏡像列

2.5 計算の手順

計算の手順は図-3のフローチャートに示す通りである。

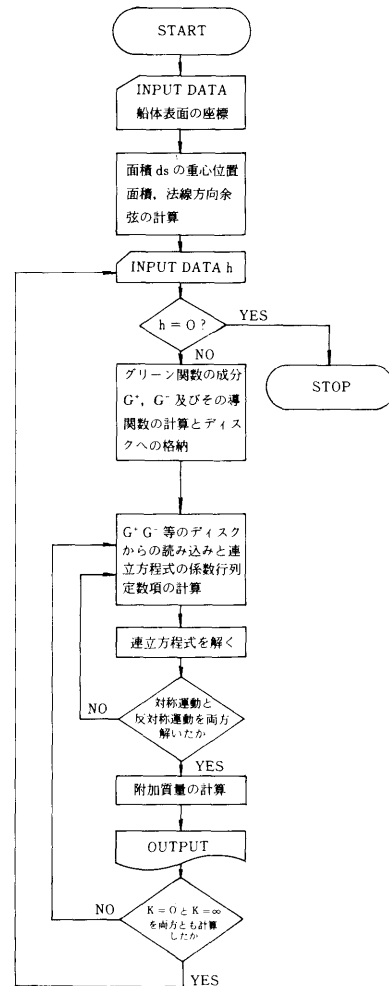


図-3 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、当所中央計算機室の FACOM M-180 II AD 用で作成したものである。サブルーチンライブラリから連立一次方程式のサブルーチンを使用しているほか、グリーン関数 G^+ , G^- 及びそれらの微分値等を周波数 0 と ∞ の 2 つの場合で、2 回同じ計算をしなくていいように、一時格納のための外部記憶装置（ディスクのテンポラリーファイル）を使用し

ているので、この点に注意することによって他機種への移行ができる。

使用メモリ数は、左右対称の物体のみ考えており、物体表面の右半分の分割数が $12 \times 24 = 288$ の場合で 469 K B、 $18 \times 36 = 648$ の場合で 1864 K B である。

外部記憶装置のメモリは、分割数 288 の場合で約 6 MB、分割数 648 の場合約 30 MB である。

3. プログラムの応用

船体表面を表わす座標を船体の片側半分について入力することにより、実用船型の附加質量が水深無限大の場合を含めて浅水の場合について計算できるようになった。入力データは、線図の Body Plan をみながら girth の分割された要素が大体同じ程度の長さになるようにオフセットから、きりのよい water line または buttock line を選んで作成しているが、この部分をもう少し自動化することによって、一層使い易いものにできるであろう。

楕円体の場合には、実用船型用のプログラムを使うより、楕円体専用のプログラムを使った方が良い精度が得られている。なお、水深無限大の場合の楕円体の附加質量の解析解を計算するプログラムも、本プログ

ラムに関連して作成してあるので利用できる。

4. あ と が き

本プログラムの完成により、楕円体の軸長比を変えた計算を系統的に行ない、船の L/B 、 B/d が浅水時附加質量に及ぼす影響や、周波数 0 と ∞ のときの違い、また運動のモードによってこれらがどう変るかなどの点を明らかにすることができた。¹⁾

更に実用船型についても、入力データの作成に 1 隻につき 1 ～ 2 日程度の労力を必要とするが、計算ができることとなり、利用価値は高いものと考えている。

なお、本プログラムの開発途上において、周波数 0 の場合についての誤った計算法と計算結果を公表²⁾してしまっただが、正しい結果を参考文献¹⁾に報告してあることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 菅信, 原口富博, 3 次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響—— $K = 0$ と $K = \infty$ の場合——, 船研報告第 21 巻第 3 号, 1984. 5
- 2) 菅信, 原口富博, 3 次元物体の附加質量に及ぼす浅水影響, 第 42 回船研究発表会講演集, 1983. 12

15. 境界要素法による楔の着水衝撃水圧の計算プログラム

共通工学部 谷 澤 克 治

1. プログラムの目的および概要

一定速度で楔が静止水面に落下する場合の楔表面の衝撃水圧の分布を計算するプログラムである。無重力を仮定し、着水衝撃現象の相似解を求めることによりスプラッシュ形状を含めた計算ができる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

楔の着水衝撃水圧の計算プログラム

2.2 製作者

共通工学部 谷澤克治

2.3 製作年月

昭和 58 年 9 月

2.4 計算の概要

問題の対称性より右半分について計算を行う。座標系を図 1 のようにとり落下速度を V_0 、楔の頂角を θ 、楔先端が着水した瞬間を時刻 $T = 0$ とし、 $T = t$ の時の楔の没入深さを $\epsilon = V_0 t$ 、速度ポテンシャルを $\Phi(x, y; t)$ 、水面形状を $F(x, y; t) = 0$ とする。ここで代表距離に ϵ 、代表速度に V_0 を用いて図 2 のように問題を無次元化すると定常問題として扱うことができる。

すなわち

$$\xi = x/\epsilon = x/V_0 t \quad (1)$$

$$\eta = y/\epsilon = y/V_0 t \quad (2)$$

$$\phi(\xi, \eta) = \Phi/V_0^2 t \quad (3)$$

$$f(\xi, \eta) = F/V_0 t \quad (4)$$

ここに ξ 、 η は無次元化座標で ϕ 、 f は無次元化され

た速度ポテンシャルと水面形状で共に変数に時間を含まない。この座標系での境界条件について述べる。最初に自由表面の Kinematic Condition は一般に

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

と書ける。これを(1)式から(4)式を考慮し、 ξ , η , ϕ , f で書き直すと

$$\frac{\partial f}{\partial \xi} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} - \xi \right) + \frac{\partial f}{\partial \eta} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} - \eta \right) = 0 \quad (11)$$

さらに、自由表面の外向き法線方向を $\vec{n}$ (n_ξ , n_η)、接線方向を $\vec{s}$ ($-n_\eta$, n_ξ) とすると(11)式は

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \xi n_\xi + \eta n_\eta \quad (12)$$

と表わせる。また(11)式は $\partial f / \partial \xi$, $\partial f / \partial \eta$ が不定となるスプラッシュ頂点でも成り立たねばならないので、頂点の座標を ξ_0 , η_0 とすると

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \Big|_{\xi=\xi_0} &= \xi_0 \\ \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \Big|_{\eta=\eta_0} &= \eta_0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

となる。次に Dynamic Condition は有次元座標では、

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] = 0 \quad (14)$$

と書けるが、これも同様に書き直すと

$$\phi - \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \xi - \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \eta + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)^2 \right] = 0 \quad (15)$$

となり、法線方向と接線方向で書くと

$$\frac{\partial \phi}{\partial s} = \sqrt{\xi^2 + \eta^2} - 2\phi - \xi n_\eta + \eta n_\xi \quad (16)$$

となる。また(13)式を(15)式へ代入してスプラッシュ頂点でポテンシャル値 ϕ_0 を規定する条件

$$\phi_0 = \frac{\xi_0^2 + \eta_0^2}{2} \quad (17)$$

を得る。次に楔面の境界条件を同様に無次元化して

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\sin \theta \quad (18)$$

対称軸である η 軸上の境界条件は

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad (19)$$

最後に圧力も無次元化した座標系では(15)式と同様に

$$\begin{aligned} \frac{P}{\rho V_0^2} &= -\phi + \frac{\partial \phi}{\partial \xi} \xi \\ &+ \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \eta \end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial \xi} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)^2 \right] \quad (20)$$

と書ける。一般に自由表面上では表面形状と流束、又はポテンシャル値が未知数であるが、(12)式を用いると表面形状から直接流束を計算することができ、求めた流束を用いて境界値問題を解けばポテンシャル値も求まるので、この問題の実際の未知数は表面形状だけであり、正しい形状を求めれば問題は解けたことになる。

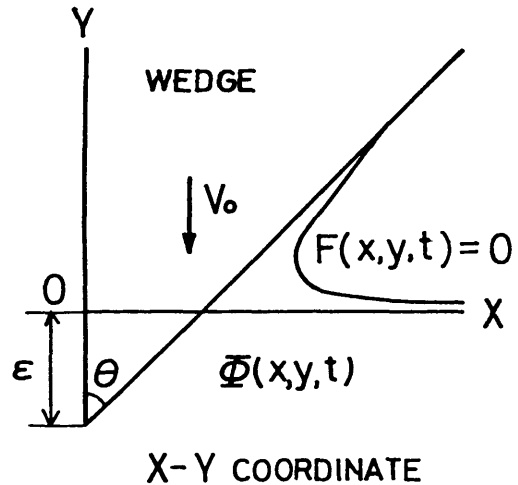


図-1 有次元座標系

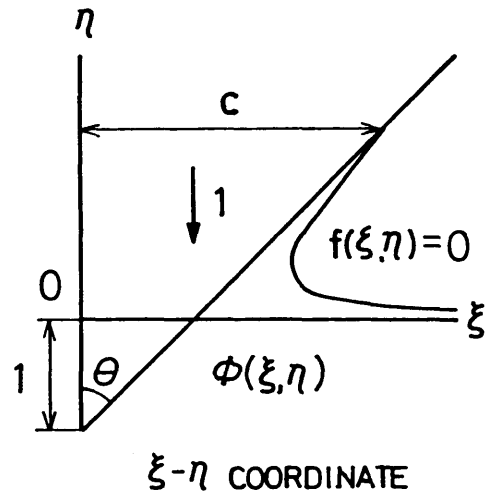


図-2 無次元化座標系

2.5 計算の手順

以上に求めた式を用いて図-3に示すような手順で計算を行う。

- 1) まず未知である自由表面形状を適当に与える。
ただし連続の条件より図-4に示すように楔の排水面積 S と自由表面の盛り上り面積 S' が等しくなるように与える必要がある。
- 2) 次に(12)式を用いて自由表面の流束を計算する。
- 3) そして(18)式(19)式より楔面と対称軸上の流束を求める。
- 4) 楔より十分離れた所に検査面をもうけ、ここでは流束は十分小さいので零とする。
- 5) 以上により境界条件がすべて流束で与えられ、図-5のようなノイマン問題が得られた。ここで発散定理より

$$\int_{\Gamma} \frac{\partial \phi}{\partial n} d\Gamma = 0 \quad \Gamma: \text{全境界}$$

を満足していなければならないが、1)で述べた条件 $S = S'$ を満足する自由表面形状を与えれば発散定理を満足することは容易に分かるであろう。

- 6) このノイマン問題を境界要素法を用いて解く。
この時(17)式で定めたスプラッシュ頂点のポテンシャル値を規準にして境界上のポテンシャル値を定める。
- 7) 以上のようにして求めた解はまだ Dynamic Condition (16)式を満足していないから、満足するまで自由表面形状を逐次近似的に修正しながら以上の手順を繰り返す。
- 8) 最後に十分な精度で満足すれば、その時の自由表面形状を正解として(20)式を用いて楔面の圧力分布を計算する。

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは計算センターの FACOM M 180 II AD 用に FORTRAN 77 レベルで製作したものであるが、システムに組み込まれているサブルーチンなどは、何も使用していないので他機種への移行に困難はないと思われる。ただ計算の精度を上げるため倍精度で計算する事が望ましい。使用メモリーは約500KBである。

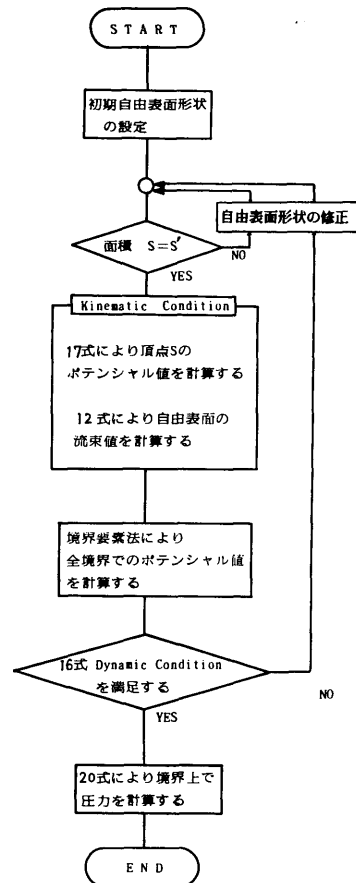


図-3 フローチャート

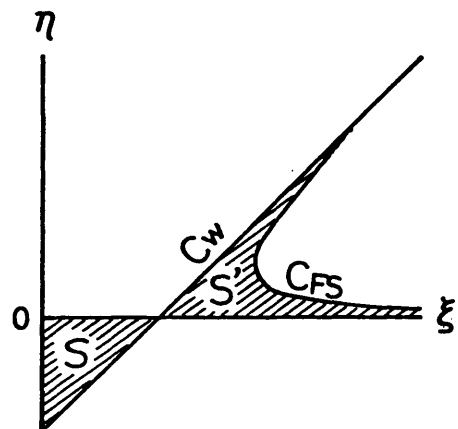


図-4 楔没入量と自由表面盛り上り量との釣り合い

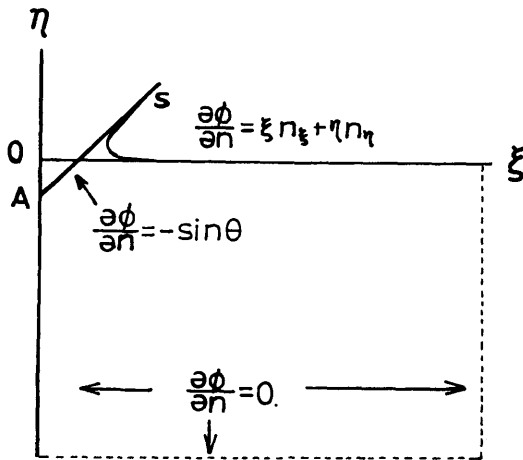


図-5 境界条件

3. プログラムの応用

このプログラムでノイマン問題を解くのに用いた境界要素法サブルーチン(線形要素分割)はスプラッシュ

頂点などの流束不連続点も扱えるように改良したものであり非常に汎用性があるプログラムである。流体力学以外の分野においても混合境界値問題の解を得る一手段として広く応用が可能である。

4. あとがき

楔の着水衝撃水圧の計算は Wagner を始め多くの研究者によって行われたが、そのほとんどが自由表面の盛り上りなど非線形性の弱い部分は考慮しているものの、スプラッシュ部など非線形性の強い部分は無視している。筆者が今回開発したプログラムはスプラッシュ形状まで含めて計算を行うので、衝撃水圧が発生するスプラッシュ根本部の様子をより正しく推定できる。

参考文献

谷澤克治, 境界要素法によるくさびの着水衝撃現象の計算, 第42回船舶技術研究所研究発表会講演集, 1983. 12

16. 2次元水中翼の特性計算プログラム

運動性能部 不破 健

1. プログラムの目的および概要

水中翼の特性は, 水中翼船の開発期に広く研究され, 特に高速領域においては詳細に調べられている。また, 水中翼は水中翼船以外にも一般船舶のコントロール・サーフェイスとしての広い用途をもつが, 低速領域における特性はあまり調べられていない。本プログラムは, 一定の深度と姿勢を保持して前進する2次元水中翼の低速領域における, 非滑走, 非キャビテーション状態の特性を計算するためのものである。特異点分布法に基づくため, 任意形状に対して適用可能であり, また多くのパラメータの組合せが考えられるので, 圧力分布の作画プログラムを付加して検討の便宜を計った。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

G-S-F法による2次元水中翼の特性計算プログラム。

Calculation Program for Characteristics of Hydrofoil Section by means of Giesing, Smith and Fuwa Method.

2.2 製作者

運動性能部 不破 健

2.3 製作年月

昭和52年6月

2.4 計算の概要

水面下の一定深度を一定の迎角で定速前進する水中翼の断面形状を折線近似して多角形で表わす。多角形の各辺上に特異点を分布させ, これにより流場を表現する。各辺の中点を代表点にとり, そこで物体表面上の境界条件を満たすこととし, 翼後縁における Kutta の流出条件を付加すれば, 特異点分布と翼のまわりの循環を未知数とする積分方程式は, 連立1次方程式に

なる。この方程式を解けば、流場は一意に定まり、圧力分布をはじめとする諸特性が計算される。ただし、特異点としては渦度を用い、各辺上の区間において線形分布するものとしている。詳細については参考文献を参照されたい。

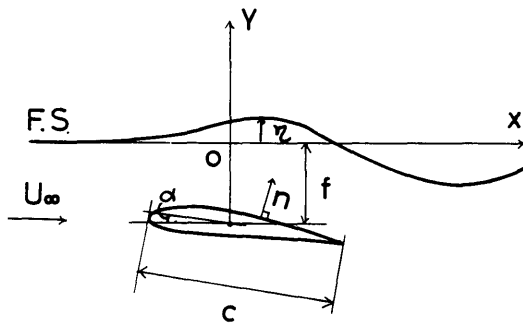


図-1 座標系および記号説明図

G-S-F 法による水中翼特性の計算プログラム流れ図

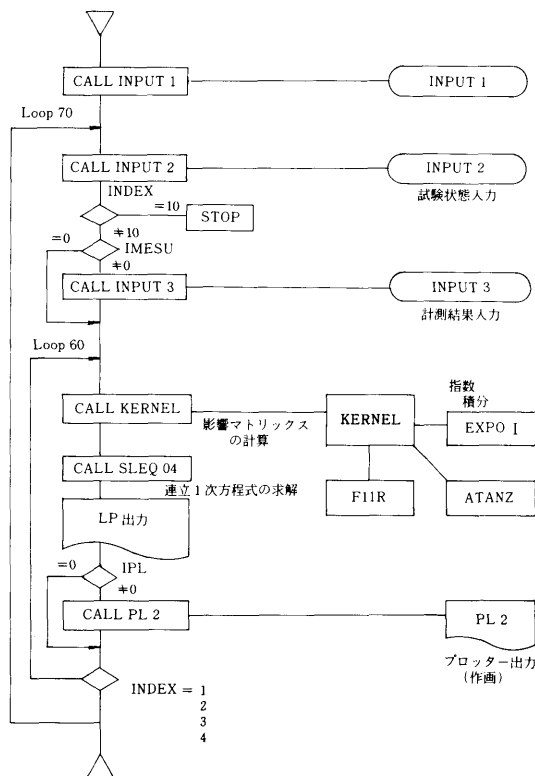


図-2 計算の流れ図

2.5 計算の手順

計算の手順を図-2の流れ図で示す。ここで入力とは形状に関するものと、作動状態に対応するものとに大別される。また、種々の計算条件を示す変数も入力される。変数等の説明を表-1に示す。

表-1 入力形式と説明

《INPUT1》……翼形状入力

```

READ (3I5) KUTTA, NKTA
READ (3I5) ISK, IPRINT, IPL
READ (A40) NAME
READ (I5) NOF
ISK=0のとき
READ (3F10.0) (XOF(I), YU(I), YL(I), I
=1, NOF)

```

- KUTTA = 0 ……Kutta の条件をつける
= 1 ……ポテンシャル流（循環のない場合）
- NKTA ……Kutta の条件を課する分割点の番号
- ISK = 0 ……任意形状物体（カード入力）
= 1 ……円柱
= 5 ……NACA4412翼型 組み込み
= 6 ……NACA0012翼型 入力
- IPRINT = 0 ……形状出力なし
≠ 0 ……形状を LP に出力する
- IPL = 0 ……プロッター出力なし
≠ 0 ……すべての結果をプロッター用 MT に出力する
- NAME ……翼型の名称等
- NOF ……オフセット入力の弦長方向の分割数
(NNT = 2 * NOF ……分割点数)
(NNT - 1 ……面素数)
- XOF ……オフセット入力
弦長方向の座標
- YU ……翼上面の座標
- YL ……翼下面の座標

17. 強潮流域における船の転覆に関する操縦運動の 計算プログラム

運動性能部 小 川 陽 弘

1. プログラムの目的及び概要

来島海峡において強潮流時に航行中の船舶が転覆する事故が連続して起ったので、その原因を究明するために、操縦運動の計算プログラムを応用・拡張して解析を行った。

流れの境界を含む水域をモデル化して平面的な shear flow と考え、その境界を横切って進む船の、横揺を含む操縦運動を計算し、転覆する可能性があるか否か、あるとすればどのような条件のときか、主要な原因は何か等を調べたものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

強潮流中の転覆運動計算

Rolling-Capsizing Motion in Shear Flow

2.2 製作者

運動性能部 小川陽弘

2.3 製作年月

昭和51年 3 月

2.4 計算の概要

通常の操縦運動を表す 3 自由度の運動方程式を、まず一様な流れの中の対地運動として表し、次に適当な仮定のもとに、これを図-1 の様な流速分布を持つ流れの中の式に変換する。これに横揺を表す第 4 の式を加えて、4 自由度の運動方程式とする。

外力としては、運動によって船体に働く流体力の他に、風による力、shear flow の水位差、荷崩れによる力等も計算に入れている。

船の運動は上記の式を積分することによって得られる。積分は Euler 法により行い、時間間隔は実船に対して 0.1 秒とした。

2.5 計算の手順

概略の流れ図を図-2 に示す。

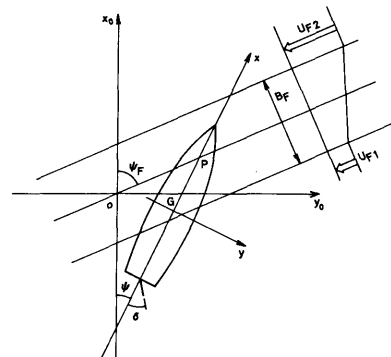


図-1 流速分布

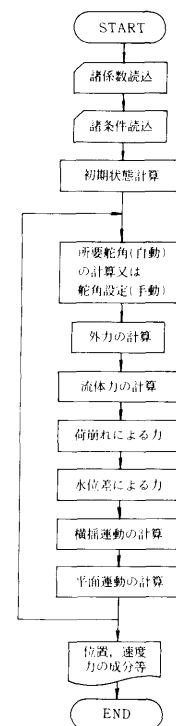


図-2 フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

このプログラムは計算センターの前計算機 TOS-BAC 5600/120用に開発したものであるが、後に現在の FACOM M-180 II AD 用に変換した。FORTRAN で約1,700ステップ、使用メモリーは約90KBである。

3. プログラムの応用

諸係数・諸条件等はカードにより入力する。多数のサブプログラムが他の操縦性関係計算プログラムと共用になっているので、使用に当っては注意を要する。

4. あとがき

本プログラムは文献¹⁾の解析のために開発したものである。プログラムの主要部は同²⁾に示したものを基本としている。

参 考 文 献

- 1) 小川陽弘：強潮流域における船の転覆について——Shear Flow 中の船体運動の計算による解析——，日本航海学会論文集，第57号，1977年8月。
- 2) 小川陽弘：風と流れの中の船の操縦運動の計算プログラム，船研報告，第7巻4号（プログラム特集第1集），1970年7月。

18. 流速変動水域における船の操縦運動の計算プログラム

運動性能部 小 川 陽 弘

1. プログラムの目的及び概要

港湾に隣接して建設される予定の発電所からの排水口が、小型船舶の航路を横切るような形で大量の排水を放出するため、これら船舶の操船に影響を与えることが予想されるので、その影響を調べ、対策を講じるための計算プログラムである。

放出流のある海域を図-1のようにモデル化して局部的な shear flow のある水面と考えると、それを横切って進む船の操縦運動を、操舵しない場合と適当な手動操舵をした場合とについて計算し、操船に及ぼす排水流の影響を調べる。

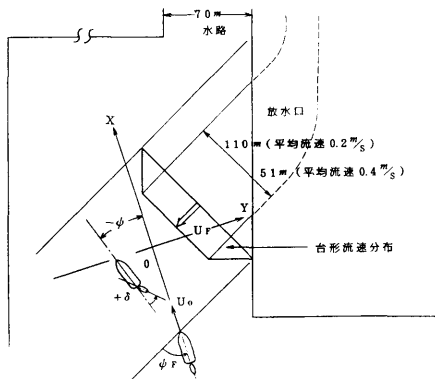


図-1 流速分布モデル

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

流速変動水域における操縦運動計算
Manoeuvrability in Shear Flow

2.2 製作者

運動性能部 小川陽弘

2.3 製作年月

昭和55年2月

2.4 計算の概要

操縦の運動方程式を船の対地運動として表し、流速の場所的变化に対応する流体力は、一様流中で得られた流体力の船長方向の分布関数を仮定して求める。

手動操舵のパターンは、仮に設定したオートパイロットによる計算を行い、その時の舵角と操舵量を近似的に満足し、かつ簡単なパターンになるように設定する。

計算は時間間隔0.1秒の Euler 法による。

2.5 計算の手順

概略の流れ図を図-2に示す。

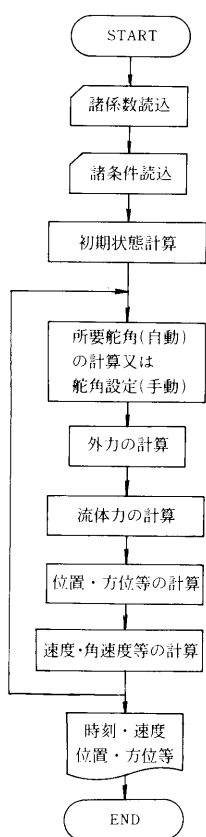


図-2 フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

このプログラムは前中央計算機 TOSBAC 5600/120 用に開発したものであるが、後に現在の FACOM M-180 II AD 用に変換した。FORTRAN で約1,400 ステップ、使用メモリーは約90KBである。

3. プログラムの応用

諸係数・諸条件等はカードにより入力する。

手動操舵パターンの決定には、先ず自動操舵による計算を行い、その時の舵角のタイムヒストリーを描き、それを近似するパターンを決める。この操作は種々の条件を考慮しながら手操作で行わなければならない。この操舵パターンもカードにより入力する。

4. あとがき

このプログラムは文献¹⁾の解析のために開発したものである。プログラムの主要部は同²⁾に示したものを基本とし、本誌別項の、強潮流域における転覆に関する計算プログラムを応用したものであるが、数学モデルについては大幅な改良が加えられている。

参 考 文 献

- 1) 小川陽弘：流速変動水域における小型船舶の操船性の予測について，第36回船研研究発表会講演集，1980年12月。
- 2) 小川陽弘：風と流れの中の船の操縦運動の計算プログラム，船研報告，第7巻4号（プログラム特集第1集），1970年7月。

19. 筏の太陽追尾シミュレーションプログラム

共通工学部 浜 島 金 司
海洋開発工学部 山 川 賢 次

1. プログラムの目的および概要

太陽エネルギー利用の一つとして洋上に筏を浮べて太陽光を集光する方式において、筏が太陽を追尾して回転するとき太陽の方位と集光鏡の方位にずれ（偏差角）が生ずる。従って、筏の姿勢制御のために追尾トルクを制御する必要がある。本プログラムは、姿勢制御の時間々隔を任意に設定し太陽を追尾したとき、そ

のずれが集光上許容誤差範囲に納まるかどうか検討するために開発したものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

筏の太陽追尾シミュレーションプログラム

2.2 製作者

共通工学部 浜島金司

海洋開発工学部 山川賢次

2.3 製作年月

昭和57年 8 月

2.4 計算の概要

静水中で太陽を追尾回転する筏の運動方程式は、次のような二階の非線形微分方程式となる。

$$I\ddot{A} + K\dot{A}|\dot{A}| = M(t) \quad (1)$$

ここに、 I は筏の鉛直軸まわりの慣性モーメント、 K は抗力係数、 $M(t)$ は筏を回転させるトルク、 A は筏の方位角である。

太陽追尾シミュレーションは、現時刻 T_i における筏の角度 $\dot{A}_i$ とトルク M_i を検出し、時間 ΔT 後に筏の方位を太陽の方位に修正できるようにトルク $M(t)$ を決め、(1)式を時系列で解くという方法で行った。

(1)はトルク M を一定とすると解析的に解けるのでこの解から方位修正に必要なトルク M_{i+1} が求まる。時刻 T_i から $T_{i+1} = T_i + \Delta T$ までのトルク $M(t)$ は、1 次遅れの形

$$M(t) = M_i + (M_{i+1} - M_i)(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

とにおいて、(1)式を数値計算で解いた。

変動外力として変動風を考慮する場合も同様に取扱うことができる。(1)式の右辺に風力モーメント M_w の項を加えて次のようになる。

$$I\ddot{A} + K\dot{A}|\dot{A}| = M + M_w \quad (3)$$

方位修正に必要なトルク M_{i+1} の計算には、 M_w の定常分のみを加え、 $M(t)$ は変動分も含めて求めた。

方位修正に必要なトルク M_{i+1} の数値計算はマラー法、運動方程式の数値計算はハミング法を用いた。いずれも、当所中央計算機の科学計算用サブルーチンライブラリーを利用した。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れを図-1 に示す。

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは計算センターの FACOM 180 II AD に作成した。使用言語は FORTRAN 77 である。

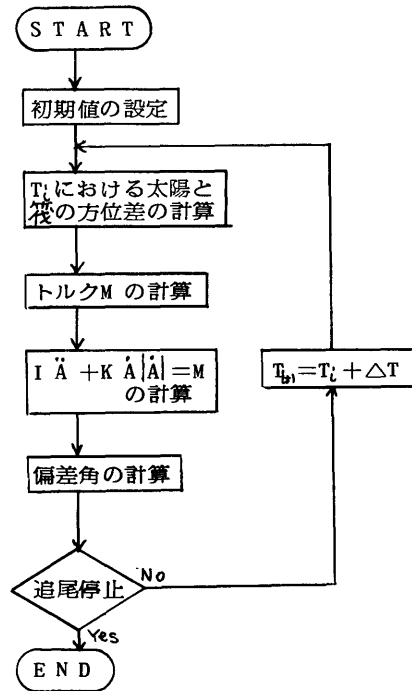


図-1 計算フローチャート

3. プログラムの応用

速度の2乗に比例する減衰項と変動外力のある場合のシステム制御計算に利用可能。

4. あとがき・その他

詳細は参考文献を参考のこと。

参 考 文 献

- 1) 山川賢次, 浜島金司, 渡辺健次, 菅信: 太陽光利用洋上水素製造輸送計画の調査研究 (第3報: 筏の位置と方向の保持), 船舶技術研究所報告 第20巻 第2号 (1983)

20. 無限行無限列円柱群のポテンシャル流場の計算プログラム

運動性能部 菅 信

1. プログラムの目的および概要

巨大な海洋構造物の支持浮体として使用される多行多列円柱群の流体力学的な問題を扱うため、等間隔で

置かれた無限行無限列の2次元柱体群のまわりのポテンシャル流場を計算するプログラムである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

無限行無限列円柱群のポテンシャル流場の計算プログラム

Added Mass of Infinite Cylinder Array (2 D)

2.2 製作者

運動性能部 菅 信

2.3 製作年月日

昭和56年6月

2.4 計算の概要

図-1のように、縦方向（流れに平行な方向）の間隔 b 、横方向（流れに直角な方向）の間隔 h で並んだ無限個の柱体群のまわりの流場の境界条件は柱体を1つだけ取り出して図-2のように表わせる。これを $x=-b/2 \sim b/2$ 、 $y=-h/2 \sim h/2$ の範囲で解くわけであるが、流場の対称性、反対称性を考慮すると図-3のような1/4の範囲を考えればよいことになる。解法は、この種の問題に常用される積分方程式法であり、使用するグリーン関数 G は

$$\begin{aligned} G_p(x, y; x', y') &= \frac{1}{2} \log \left\{ \cosh 2\frac{\pi}{b}(y-y') - \cos 2\frac{\pi}{b}(x-x') \right\} \\ &\quad - \frac{1}{2} \log \left\{ \cosh 2\frac{\pi}{b}(y-y') \right. \\ &\quad \left. - \cos 2\frac{\pi}{b}(x+x') \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

とおいたとき次式で表わされるものである。

$$G(x, y; x', y') = G_p(x, y; x', y') + G_p(x, y; x', -y) \quad (2)$$

これを使うと積分方程式は、図-3のSとBの上で解けば良いこととなり、次のように表わされる。

$$\phi(x, y) + \frac{1}{\pi} \int_{S \cup B} G_n \phi ds = \frac{1}{\pi} \int_S G \phi_n ds \quad (3)$$

これを数値的に解いたあと附加質量を計算する。

なお、(2)のかわりに

$$\begin{aligned} G'(x, y; x', y') &= G_p(x, y; x', y') \\ &\quad + G_p(x, y; x', -y) \end{aligned} \quad (4)$$

を使えば、積分方程式を解く範囲が図-3のSとDに移るので、未知数を減らせた筈であるが、プログラムを作成してしまった後で気がついたためそうには直していない。

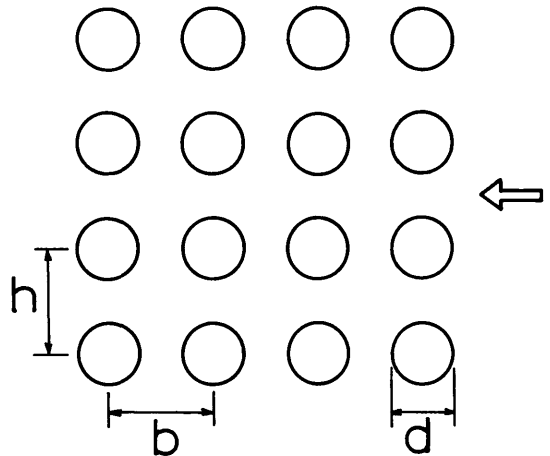


図-1 円柱群

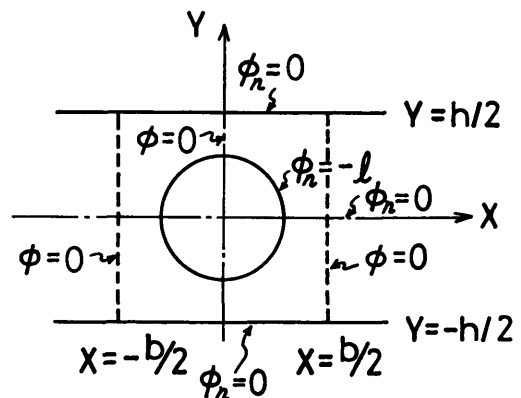


図-2 境界条件

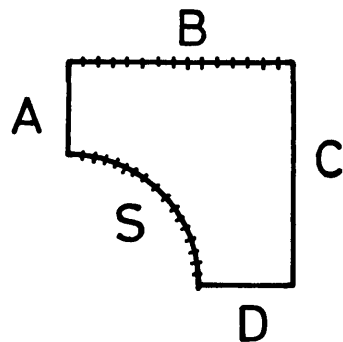


図-3 積分領域

2.5 計算の手順

計算の手順は図-4のフローチャートに示す通りである。

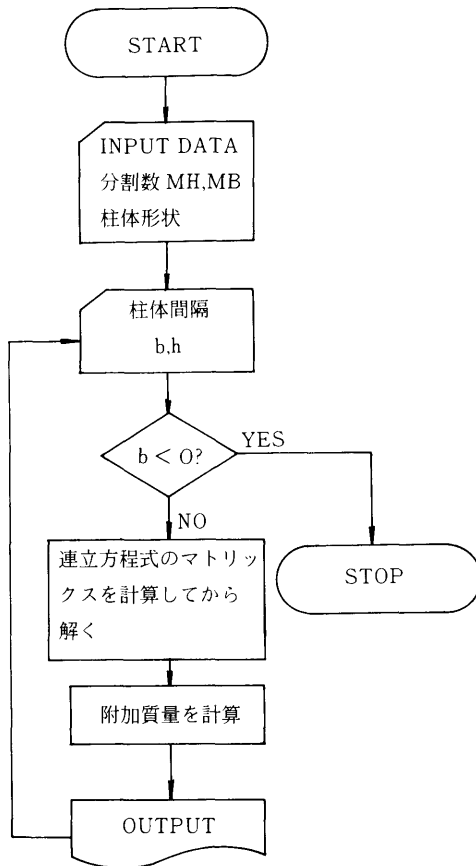


図-4 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、当所中央計算機室の FACOM M-180 II AD 用に作成したものであるが、サブルー

チンライブラリから連立一次方程式を解くサブルーチンを使っているだけで、かつ外部記憶装置を使用していないため他機種への移行に問題はない。

使用メモリは、境界の分割数を400まで許すと約730 KBであるが、これほどの分割数をとる必要がないのが普通でありもっと使用メモリは少なくできる。

3. プログラムの応用

海洋構造物に使用される柱体としては円柱が多いが本プログラムで扱える柱体の断面形状としては、 x 軸と y 軸に関して対称なものなら任意の形状でよい。

柱体が流れに平行に一列に並んだ場合については、本プログラムで $h = \infty$ とすればよいので、 B 上の分割数 MB に0を与えることによって計算できるようになっている。また流れに直角に並んだ場合については、本プログラムでは計算できず、筆者が先に作成した別のプログラム²⁾を利用することになる。

4. あとがき

本プログラムによる円柱群についての計算の結果¹⁾ $h \geq b$ 即ち横方向の円柱間隔 h が縦方向の間隔 b と同程度以上ならば、横列干渉（流れと直角に並んだ円柱列による干渉）はほとんど無視してよいことが明らかになり、これまで粘性流体の実験で知られていた事実が、ポテンシャル流についても成りたつことなどが判った。

実際の海洋構造物等では、円柱群は有限個であり先頭円柱など端部影響も扱えるような計算法を開発する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 遠藤久芳, 菅信, 大松重雄, 山川賢次, 菅進, 渡辺健次, 太陽光利用洋上水素製造・輸送計画の調査研究 (第1報: 筏の構造と流力特性), 船研報告, 第19巻, 第4号, 1982. 7
- 2) 菅信, 水路内の2次元柱状体のまわりの流れの計算プログラム, 船研報告, 第8巻第6号, 1971. 11

21. ポテンシャル接続法による 2 次元流体力の計算プログラム

海洋開発工学部 大 川 豊

1. プログラムの目的および概要

2 次元柱状体に働く動揺流体力および波強制力に関する計算法はすでに多くの手法が開発されている。本計算プログラムは有限水深における矩形断面という限定された条件はあるが、その特徴を利用して比較的短時間で精度のよい解が得られる。プログラムは没水矩形断面浮体に対する radiation 問題, diffraction 問題を解くものおよび矩形断面浮体に対する radiation-diffraction 問題を解くものがあり、それぞれ付加質量係数, 減衰係数, 波強制力および反射波, 透過波係数などが計算できる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

- (1) 有限水深における没水矩形断面に働く流体力計算プログラム (SUBREC)
- (2) 有限水深における没水矩形断面に働く波強制力計算プログラム (SUBKAK)
- (3) 有限水深における矩形断面浮体に働く流体力および波強制力計算プログラム (BARGES)

2.2 製作者

海洋開発工学部 大川 豊

2.3 製作年月

昭和54年 7 月, 昭和56年 4 月改訂

2.4 計算の概要

図一 1 に示す様に, x の正方向から入射波があり, 没水矩形浮体が平衡位置のまわりに微小運動を行うものとし, 流体を I ~ IV の領域に分ける。(矩形断面浮体の場合は II の領域がなくなる。) 各領域において, 自由表面条件, 水底条件および没水体の表面における運動学的境界条件を満たすラプラス方程式の一般解である速度ポテンシャルを求めると次の様に表わせる。

領域 I

$$\phi_1(x, z) = \{Ae^{ik_0x-l} + Be^{ik_0x-l}\} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$$

(238)

$$+ \sum_{m=1}^{\infty} C_m e^{-k_m(x-l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (1)$$

領域 II

$$\begin{aligned} \phi_2(x, z) = & \left(D \frac{\cos k'x}{\cos k'l} + E \frac{\sin k'x}{\sin k'l} \right) \\ & \times \frac{\cosh k'(z+q_1h)}{\cosh k'q_1h} \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left(F_n \frac{\cosh k'_n x}{\cosh k'_n l} + G_n \frac{\sinh k'_n x}{\sinh k'_n l} \right) \\ & \times \frac{\cos k'_n(z+q_1h)}{\cos k'_n q_1h} \\ & + 2i \frac{h}{l} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{(\mu_s h)^2} \cdot \frac{\gamma \sin h \mu_s z + \mu_s h \cosh \mu_s z}{\gamma \cosh q_1 \mu_s h - \mu_s h \sinh q_1 \mu_s h} \\ & \times \left\{ \eta \omega h \cos \mu_s x + \left(\frac{h}{l} \right)^2 \varphi \omega l^2 \frac{\sin \mu_s x}{\mu_s h} \right\} \quad (2) \end{aligned}$$

領域 III

$$\begin{aligned} \phi_3(x, z) = & \sum_{r=0}^{\infty} \left(H_r \frac{\cosh Rr}{\cosh Rl} \right. \\ & \left. + I_r \frac{\sinh Rr}{\sinh Rl} \right) \cos R(z+q_z h) \\ & + 2i \frac{h}{l} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{(\mu_s h)^2} \cdot \frac{\cosh \mu_s(z+h)}{\sinh(1-q_2) \mu_s h} \\ & \times \left\{ \eta \omega h \cos \mu_s x + \left(\frac{h}{l} \right)^2 \varphi \omega l^2 \right\} \frac{\sin \mu_s x}{\mu_s h} \quad (3) \end{aligned}$$

$$\phi_4(x, z) = J e^{ik_0(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh}$$

領域 IV

$$\begin{aligned} \phi_4(x, z) = & J e^{ik_0(x+l)} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} L_m e^{k_m(x+l)} \frac{\cos k_m(z+h)}{\cos k_m h} \quad (4) \end{aligned}$$

ここで ω は円周波数であり、速度ポテンシャルは $\Phi(x, z; t) = \phi(x, z)e^{i\omega t}$ の形であるとする。Aは入射波の速度ポテンシャルを表わす定数で、振幅を ξ_a 、重力加速度を g とすると

$$A = i\xi_a g e^{ikl}/\omega \quad (5)$$

である。B, Jはそれぞれ反射波、透過波を表わし、 $C_m, L_m, D, E, F_n, G_n, H_r, I_r$ とともに未定係数である。 k と k_m は次式により決まる固有値である。

$$\frac{\omega^2 h}{g} = kh \tanh kh = -k_m h \tan k_m h \quad (m=1, 2, \dots) \quad (6)$$

同様に k' と k'_n は次式により決まる固有値である。

$$\begin{aligned} \frac{\omega^2 q_1 h}{g} &= k' q_1 h \tanh k' q_1 h \\ &= -k'_n q_1 h \tan k'_n q_1 h \quad (n=1, 2, \dots) \end{aligned} \quad (7)$$

また、 $\gamma = \omega^2 h/g$, $\mu_s = (2s+1)\pi/2l$ (s は整数)。 $R = r\pi/(1-q^2)h$ (r は整数), η, φ はそれぞれ上下揺れ、横揺れの複素振幅を表わす。

領域I～IVにおける速度ポテンシャルが仮想境界面 $x = \pm l$ において流体領域では連続であること、I, IVにおける物体側面では運動学的境界条件を満たすこと、即ち

$$x = l \text{ で}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_1}{\partial x} &= \frac{\partial \phi^2}{\partial x} & (0 > z > -q_1 h) \\ &= i\omega \xi - \varphi(z - \bar{z}_0) & (-q_1 h > z > -q_2 h) \\ &= \frac{\partial \phi_3}{\partial x} & (-q_2 h > z > -h) \\ \phi_1 &= \phi_2 & (0 > z > -q_1 h) \\ \phi_3 &= \phi_4 & (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$x = -l \text{ で}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi_4}{\partial x} &= \frac{\partial \phi_2}{\partial x} & (0 > z > -q_1 h) \\ &= i\omega \xi - \varphi(z - \bar{z}_0) & (-q_1 h > z > -q_2 h) \\ &= \frac{\partial \phi_3}{\partial x} & (-q_2 h > z > -h) \\ \phi_4 &= \phi_2 & (0 > z > -q_1 h) \\ &= \phi_3 & (-q_2 h > z > -h) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

なる条件と、関数系 $\{\cosh k(z+h), \cos k_m(z+h)\}$, $\{\cosh k'(z+q_1 h), \cos k'_m(z+q_1 h)\}$, $\{\cos R(z+q_2 h)\}$ の直交性を利用して、未定係数に関する連立方程式が導びかれる。ここで $\bar{z}_0$ は物体静止位置での重心点の z 座標、 ξ は左右揺れ複素振幅である。

連立方程式を解けば未定係数が定まり、(1)～(4)式に

よって各領域の速度ポテンシャルが求まるので

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (10)$$

より圧力が与えられるから、これを物体まわりに積分すれば流体力又は波強制力が求まる。 ρ は流体密度である。

連立方程式の係数行列は、流場が対称の場合と反対称の場合があるので2回連立方程式を解くことになる。

計算の精度は速度ポテンシャルの級数を何項とるかで決ってくるが、20項を標準としている。

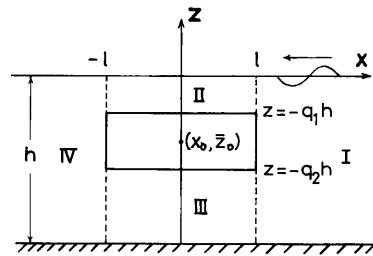


図-1 座標系

2.5 計算の手順

計算の手順を図-2のフローチャートに示す。

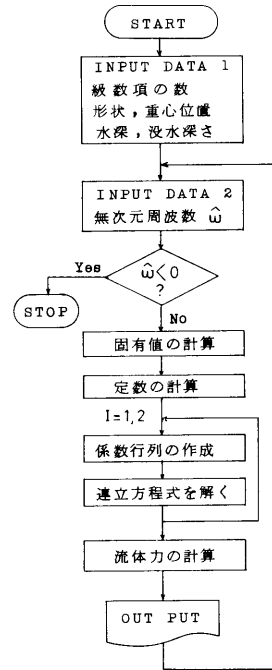


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは TOSBAC-5600 で作成し、ほとんど変更なく FACOM-M 180 II AD でも動いている。他機種への移行も容易と思われる。リージョンサイズは 256 K B である。

3. プログラムの応用

海洋構造物のロワーハルや箱型船に働く流体力および波強制力の計算に利用できる。また、空気式波エネルギー変換装置の効率の計算法の一つである等価浮体法における等価浮体の流体力係数の計算にも利用された。

本プログラムは radiation と diffraction とに分けて作成してあるが、分けなくて運動を直接解くこともできる。BARGES については若干の手直しでそれが可能である。

4. あとがき

没水矩形断面の場合は文献2)に示されている様に没水深が浅い場合には本計算プログラムによる結果は実験値と合わなくなるので注意が必要である。これは線型ポテンシャル理論の限界である。

垂直円柱、コラム付フーティングなどの3次元軸対称物体に対しても本法と同様な手法で計算でき、特異点分布法や有限要素法よりも計算時間が短いので、今後プログラムを作成する予定である。

参 考 文 献

- 1) 井島武士他：有限水深の波による矩形断面物体の運動と波の変形，土木学会論文報告集，第202号，1972。
- 2) 大川豊：箱型没水体に動く流体力について，船舶技術研究所報告，第17巻第2号，1980。

22. 浮遊式海洋構造物の運動計算プログラム

海洋開発工学部 加藤 俊 司

1. プログラムの目的及び概要

本プログラムは、波浪中における海洋構造物の6自由度運動応答及び波浪荷重を計算するものである。計算手法は Hooft¹⁾の方法と基本的には同じである。つまり、浮遊式海洋構造物を基本的な部材要素に分割し、それぞれに働く流体力及び波浪外力を別個に求めそれを代数加算して全体に働く流体力及び波浪外力とするということである。全体に働く流体力及び波浪外力が求まれば、6自由度の連成運動方程式を解くことによって波浪中の運動応答を計算することができる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

浮遊式海洋構造物の波浪中運動計算プログラム

2.2 製作者

海洋開発工学部 加藤 俊司

2.3 製作月日

昭和58年4月製作。昭和59年4月、プレッシングを考慮でき、粘性減衰力も考慮できるように拡張。

2.4 計算の概要

2.4.1 基本仮定

- (1) 波浪外力および運動は調和振動とする。
- (2) 波は微小振幅波であり、またその応答の運動も微小振幅である。
- (3) 構造物の部材断面寸法は、波長に比べて小さくその部材間の干渉は無視できる。
- (4) 非線形減衰係数で運動と波粒子との相対速度の二乗の項を考慮する場合は等価線形化できる。

2.4.2 6自由度6連成運動方程式

一般に、浮遊式海洋構造物の運動方程式は、次式のように6自由度6連成運動方程式として表わされる。

$$\sum_{i=1}^6 \{ (M_{ji} + m_{ji}) \ddot{X}_i + N_{ji}^1 \dot{X}_i + N_{ji}^2 (\dot{X}_i - \dot{U}_i) | \dot{X}_i - \dot{U}_i | \} + (K_{ji}^1 + K_{ji}^2) X_i = F_j \quad (j=1, \dots, 6) \quad (1)$$

ここで添字の1～6は、1：Surge，2：Sway，3：heave，4：roll，5：pitch，6：yawのモードを表わし、

m_{ji} : 付加質量または、付加慣性モーメント

M_{ji} : 質量または慣性モーメント

N_{ji}^1 : 線形減衰係数

N_{ji}^2 : 粘性減衰係数

K_{ji}^1 : 静的復原力係数

K_{ji}^2 : 係留復原力係数

F_j : 波浪外力

X_i : 直線または回転運動変位

U_i : 平均波粒子速度

である。なお、座標系は、図-1のように定める。図中の原点は構造物の重心にとる。

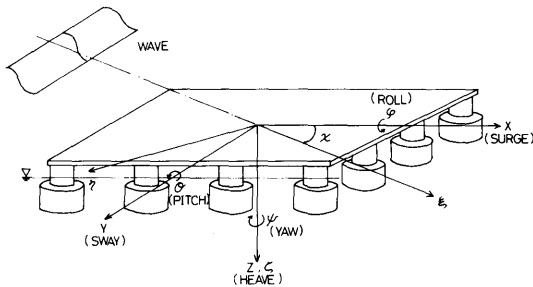


図-1 座標系

2.4.3 流体力係数

構造物を構成する要素を、ローハルとポンツーン、カラム、ブレーシング、及びフーティング付コラムの4種に分類し、それらに対して異なる方法で流体力を計算しておき、それらを代数加算することによって全体構造物の付加質量、線形減衰係数を求める。使用者はそのつど以下に述べるような構成要素の扱い方を考慮して各部材を分類する必要がある。

(1) ローハルとポンツーン

ローハル及びポンツーンは一般に排水容積の最も大きい柱体であるから、構造物の運動への寄与も最も大きいと考えられる。また、これらの断面形状も多種多様であるので、まず、大きく、没水体と浮体に分類し、それをストリップ法が適用できる場合とできない場合に区別し、ストリップ法が適用できる場合は2次元領域分割法²⁾によって求めた流体力を使用し、スト

リップ法が適用できない場合は、それ自体を単独要素と考え、3次元特異点分布法³⁾によって求めた流体力を使用する。

ストリップ法が適用できるかできないかの基準は、文献〔4〕を参照し、 L/B （長さ・幅比）が5以上の場合はストリップ法が適用できるとし、 L/B が5未満の場合はストリップ法が適用できないとした。

(2) カラム

カラムは一般に、水面を切る円柱体と考える。流体力は、3次元特異点分布法、または領域分割法³⁾やF. E. M⁵⁾によって求めた結果を使用する。

(3) ブレーシング

ブレーシングは一般に比較的小容積の円柱体と考えられ、運動に及ぼす影響は小さいので、流体力としては、モリソン式の C_M 係数から求められる付加質量係数のみを考慮する。従って周波数依存は考えない。

(4) フーティング付コラム

フーティング付コラムは二つの円柱が同軸で組み合わされた形状で近似する。流体力は、領域分割法または、F. E. Mによって求めた結果を使用する。

(1), (2), (4)形状の流体力の作用点は、もし連成流体力係数が求められれば、それから逆算するが、もし求められない場合は浮心の位置とする。

構造物の総付加質量及び線形減衰係数を計算するには次のようにして行う。ただし、要素間の相互干渉はないものとする。

a) (1), (2), (4)の構造要素の場合

これらの要素に対しては、流体力は、図-2に示す物体要素の中心 (x_d, y_d, z_d) に集中して作用すると考える。今、 x, y, z 方向の流体力係数を $a_{dxx}, a_{dyy}, a_{dzz}$ とし、要素が x 方向に振動している場合を考えると x 方向に振動したことによって生ずる (x_0, y_0, z_0) まわりの連成流体力係数は次のように求められる。

$$\begin{aligned} a_{d\phi x} &= 0 \\ a_{d\theta x} &= a_{dxx}(z_d - z_0) \\ a_{d\psi x} &= -a_{dxx}(y_d - y_0) \\ a_{d\gamma x} &= a_{dxx} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

同様にして、 $y, z, \theta, \varphi, \psi$ 方向に振動したことによって生ずる (x_0, y_0, z_0) まわりの連成流体力係数が求められる。

$$K_{35}^{-1} = \sum_d \frac{\rho g \theta_{dz}}{\sin \gamma_{dz}} (x_{dz} - x_0)$$

$$K_{45}^{-1} = - \sum_d \frac{\rho g \theta_{dz}}{\sin \gamma_{dz}} (y_{dz} - y_0)(x_{dz} - x_0)$$

また、 K_{ji}^2 については、係留ラインを水平及び垂直方向の線形ばねに置き換え、係留点にこれらのばねによる復原力が生ずるものとして2.4.3節のa)と同じ方法で求める。

2.4.6 波浪外力

波の伝播方向は図-1に示すように、浮体の x 軸に対して角度 κ をなす ξ 方向である。構造物全体に働く波浪外力は次のようにして求める。

a) (2), (4)の要素の場合

この場合は、波の入射角 κ に対して無関係であるから一方向についての波強制力を領域分割法あるいはF. E. Mによって求めておくと、任意の入射角に対しての波強制力及び波強制モーメントは次のようにして求められる。

$$\begin{aligned} F_{dx} &= F_{e0} \cos \kappa \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\xi) \\ F_{dy} &= F_{e0} \sin \kappa \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\xi) \\ F_{dz} &= F_{e0} \sin(\omega t - k\xi - \varepsilon_\xi) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\text{Roll moment: } K_a = F_{dx}(y_a - y_0) - F_{dy}(z_a - z_0)$$

$$\text{pitch moment: } M_a = F_{dx}(z_a - z_0) - F_{dz}(x_a - x_0) \quad (8)$$

$$\text{yaw moment: } N_a = F_{dy}(x_a - x_0) - F_{dz}(y_a - y_0)$$

b) (1)の要素の場合

この場合は、波の入射角に対して波強制力が変化するため、入射角に対する波強制力を3次元特異点分布法によって求め、その値を用いる。

c) (3)の要素の場合

直径が波長に比べて小さいとし、一方長さは波長に対して無視できないものとする、ブレーシングに働く波強制力は(付加質量+排水量/ g)と加速度の積によって求められる。従って例えば、 ξ 方向の力 X_κ は ξ 、 ζ 方向の水粒子の加速度成分が求められれば、次のようにして求められる。

$$X_\kappa = X_{\kappa\xi} + X_{\kappa\zeta} \quad (9)$$

$$\text{ここで、 } X_{\kappa\xi} = \cos^2 \alpha_g (a_d + \rho O_d) \int_0^{l_d} \ddot{\xi} dr \quad (10)$$

$$X_{\kappa\zeta} = -\sin \alpha_g \sin \gamma_g (a_d + \rho O_d) \int_0^{l_d} \ddot{\zeta} dr$$

$$\xi_i = x_{di} \cos \kappa + y_{di} \sin \kappa$$

$$\eta_i = -x_{di} \sin \kappa + y_{di} \cos \kappa$$

$$\zeta_i = z_{di} \quad (11)$$

$$\sin \alpha_g = \frac{\xi_2 - \xi_1}{l_d} \quad -90^\circ < \alpha_g < 90^\circ$$

$$\sin \beta_g = \frac{\eta_2 - \eta_1}{l_d} \quad -90^\circ < \beta_g < 90^\circ$$

$$\sin \gamma_g = \frac{\zeta_2 - \zeta_1}{l_d} \quad -90^\circ < \gamma_g < 90^\circ$$

同様に、 Y_κ 、 Z_κ が求められ、 X_κ 、 Y_κ 、 Z_κ から x 、 y 、 z 方向の波強制力が次のようにして求められる。

$$\begin{aligned} F_{dx} &= X_\kappa \cos \kappa - Y_\kappa \sin \kappa \\ F_{dy} &= X_\kappa \sin \kappa + Y_\kappa \cos \kappa \\ F_{dz} &= Z_\kappa \end{aligned} \quad (12)$$

(12), (8)式を用いることによって、 (x_i, y_i, z_i) まわりのモーメントに換算することができる。

a), b), c)の要素に働く波強制力及び波強制モーメントを代数加算することによって構造物全体に働く波強制力及び波強制モーメントを求めることができる。

2.4.7 質量及び慣性モーメント

各構成要素の排水量を加算することによって全体構造物の総排水量を求め、それを重力加速度で割ることによって質量とする。また、慣性モーメントは、各構成要素の排水量に、要素の重心位置と構造物全体の重心の位置との距離の自乗をかけ、それを要素数だけ加算することによって求める。なお、この値は、実験から求めた値を使用することも可能である。

2.5 計算手順

(1)式の運動方程式の解法は次のようにして行なう。

- i) 粘性減衰力がないとして(1)式の線形運動方程式を解く。
- ii) 求められた運動速度 $\dot{X}_i$ と波のオービタルモーションによる速度 $|\dot{U}_i|$ との相対速度振幅 V_i を計算する。
- iii) 粘性減衰力を考慮して(1)の非線形運動方程式を解く。
- iv) V_i がある値に収束するまでii), iii)をイテレーションし、最終結果を求める。

なお、文中の $\dot{U}_i$ は浅水域における規則波の速度ポテンシャルと各構成要素の浮心の位置とから求めるものである。

i) ~ iv)までの計算フローチャートを図-4に示す。

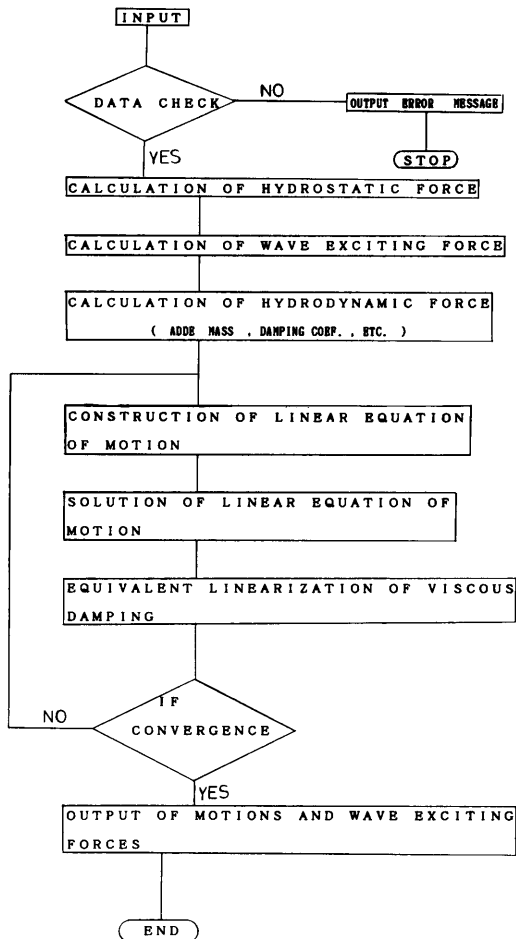


図-4 計算フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは科学計算用ライブラリーを一切使用していないため、どのような機種にもかけられる。使

用に必要なメモリー数は512KBで、入力制限事項は以下の通りである。

- (1) 波周波数の数 40以下
- (2) 波との出合角との数 10以下
- (3) 構成要素の数 300以下

なお、出力はL・Pのみである。

3. プログラムの応用

本プログラムを統計処理のプログラムと組み合わせれば、構造物の運動の短期及び長期予測が可能となる。また、構造解析プログラムと組み合わせれば、各部のたわみ、曲げモーメント等を計算することができる。

4. あとがき

今後は、係留ラインの非線形特性、要素間の相互干渉、波高減衰効果、さらには波漂流力特性を考慮できるようにする予定である。

参考文献

- 1) J. P. Hooft : A mathematical method of determining Hydrodynamically induced Forces on a semisubmersible. SNAME, Vol 79 (1971)
- 2) 大川豊：矩形断面を有する二次元柱状体に働く流体力の計算，船舶技術研究所報告，第15巻第1号 (1978)
- 3) 大川豊：コラム付没水体に働く波強制力について，第40回船舶技術研究所講演集 (1982)
- 4) 第179回研究部会：箱型海洋構造物の運動特性及び係留システムに関する研究，日本造船研究協会研究資料第346号 (1982)
- 5) 安藤定雄，影本浩，加藤俊司：要素浮体群に働く波強制力について，第42回船舶技術研究所講演集 (1984)

23. 3次元特異点分布法による動揺流体力計算プログラム

海洋開発工学部 大川 豊

1. プログラムの目的および概要

半潜水型海洋構造物に働く動揺流体力や波強制力は簡便な方法として Hooft 法によって推定されている

が、厳密な3次元流体力を求めるためにはポテンシャル理論に基き、任意な形状に適用できる3次元特異点分布法が最も一般的な方法と考えられる。またL/Bが1に近い箱型浮体にはストリップ法が適用しにく

く、3次元流体力の推定が必要である。そこで、Faltinsen ら¹⁾の示した方法に基づき、有限水深に対する Green 関数を用いた積分方程式を解く、3次元特異点分布法による流体力の計算プログラムを作成した。

対象とした形状は、箱型浮体、下面カットアップ付きポンツーン、箱型没水体（ローハル）、コラム付き（2本又は3本）ローハルなどであり、それぞれ動揺流体力、波強制力が求められる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

3次元特異点分布法による流体力計算プログラム (SUBCOL)

2.2 製作者

海洋開発工学部 大川 豊

2.3 製作年月

昭和57年10月

2.4 計算の概要

図-1に示す座標系を用いて全速度ポテンシャルを次の様に表わす。

$$\phi = \phi_0 e^{-i\omega t} + \phi_j e^{-i\omega t} + \sum_{i=1}^6 \phi_i \dot{\eta}_i \quad (1)$$

$\phi_0 e^{-i\omega t}$ は入射波の速度ポテンシャルで次式で表わされる。

$$\phi_0 e^{-i\omega t} = \frac{g \zeta_a}{\omega} \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \times e^{i(kx \cosh \alpha + ky \sinh \alpha - \omega t)} \quad (2)$$

ここで g は重力加速度、 ζ_a は入射波振幅、 k は

$$\frac{\omega^2 h}{g} = kh \tanh kh \quad (3)$$

を満たす。

$\phi_j e^{-i\omega t}$ は diffraction ポテンシャル、 $\phi_j (j=1,6)$ は j モードの運動による速度ポテンシャルである。

これらの速度ポテンシャルは、ラプラス方程式、水底条件、自由表面条件を満たし、更に $\phi_j \dot{\eta}_j (j=1,6)$ と $\phi_j e^{-i\omega t}$ は radiation 条件を満たす。この様な速度ポテンシャルを求める積分方程式は有限水深に対するグリーン関数を用いて次の様に表わすことができる。

$$\begin{aligned} & -2\pi Q_j(x,y,z) + \iint_S Q_j(\xi,\eta,\zeta) \frac{\partial}{\partial n} G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta) ds \\ & = \begin{cases} n_j (j=1,6) \\ -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (j=7) \end{cases} \quad (4) \end{aligned}$$

S は物体表面を表わし、 (ξ, η, ζ) は S の座標、 $Q_j(\xi, \eta, \zeta)$ は S 点の吹出し密度を表わす。また n_j は物体表面上の外向き法線を $\mathbf{n}$ としたとき

$$\begin{aligned} \mathbf{n} &= (n_1, n_2, n_3) \\ \mathbf{r} \times \mathbf{n} &= (n_4, n_5, n_6) \end{aligned} \quad (5)$$

である。

グリーン関数 $G(x, y, z; \xi, \eta, \zeta)$ は kr_1 によって次の2つの表現を用いる。

$kr_1 \geq 0.1$ のとき

$$\begin{aligned} G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta) &= \frac{2\pi(v^2-k^2)}{k^2 h - v^2 h + v} \\ & \cosh k(z+h) \cosh k(\zeta+h) \{ Y_0(kr_1) - iJ_0(kr_1) \} \\ & + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\mu_k^2 + v^2}{\mu_k^2 h + v^2 h - v} \\ & \cdot \cos \{ \mu_k(z+h) \} \cos \{ \mu_k(\zeta+h) \} \\ & \cdot K_0(ykr_1) \end{aligned} \quad (5)$$

$kr_1 < 0.1$ のとき

$$\begin{aligned} G(x,y,z;\xi,\eta,\zeta) &= \frac{1}{R} + \frac{1}{R^1} + 2PV \\ & \times \int_0^{\infty} \frac{(\mu+v)e^{-\mu h} \cosh \mu(\zeta+h) \cosh \mu(z+h) J_0(\mu r_1)}{\mu \sinh \mu h - v \cosh \mu h} d\mu \\ & + i \frac{2\pi(k^2-v^2) \cosh(\zeta+h) \cosh k(z+h)}{k^2 h - v^2 h + v} J_0(kr_1) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $v = \omega^2/g$ 、 μ_k は次の方程式を満たす固有値である。

$$\mu_k \tan \mu_k h + v = 0 \quad (7)$$

また、 $r_1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}$

$$R = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z-\zeta)^2} \quad (8)$$

$$R^1 = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + (z+2h-\zeta)^2}$$

J_0 は 0 次の第 1 種ベッセル関数

Y_0 は 0 次の第 2 種ベッセル関数

K_0 は 0 次の第 2 種変形ベッセル関数である。

浮体の表面を四辺形要素に分割し、各要素上では吹出しが一定であるとして(4)式を離散化すると Q_j に関する連立方程式が導かれるので、これを解けば速度ポテンシャルが決定される。この解を用いて j モードの運動に対する k モードの付加質量、減衰係数は次式で求められる。

$$\begin{aligned} A_{kj} &= -\rho Re \{ \iint_S \phi_j n_k ds \} \\ B_{kj} &= -\rho \omega Im \{ \iint_S \phi_j n_k ds \} \end{aligned} \quad (9)$$

また、波強制力は次式より求まる。

$$F_j = i\omega\rho \iint_s (\phi_0 + \phi_1)n_j ds \quad (10)$$

ここで ρ は流体の密度である。

本プログラムは x 軸および y 軸に対して対称な浮体を扱う様になっているので、運動モードによって4種類の係数行列ができるため、4回連立方程式を解くことを繰り返す。また、 $j=7$ では入射角度 β は右辺だけに関係するので、7種類までの β に対して一度に解けるようにしてある。

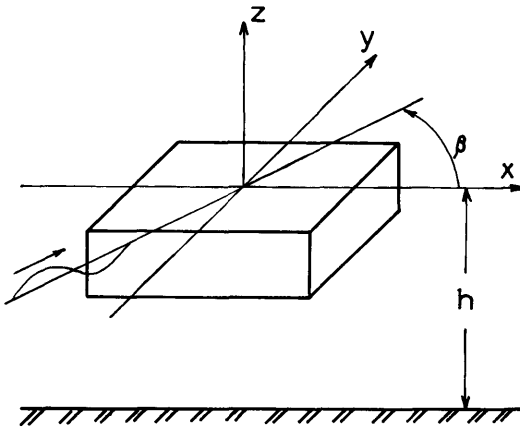


図-1 座標系

2.5 計算の手順

フローチャートを図-2に示す。

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは FACOM-M 180 II AD で作成した。ベッセル関数のみ FACOM のライブラリーを用いているが、他は特殊な命令、関数等は使用していないので他機種への移行は容易と思われる。リージョンサイズは100要素の場合1108K B、150要素の場合2014K Bである。

3. プログラムの応用

現在は図-3に示す様な5種類の形状に対して計算可能である。他の形状に対しては、四辺形要素の座標を計算するサブルーチン CORDS、座標番号と要素番号を対応づけるサブルーチン SEARCH を作成すれば、形状パラメータ、分割数などの COMMON 文を多少変えるだけで計算できる。箱型浮体に関しては更に運動、浮体周辺の波高分布の計算も可能である。

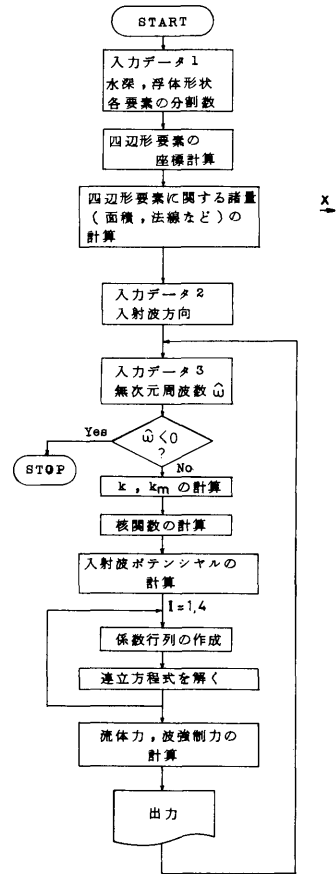


図-2 計算のフローチャート

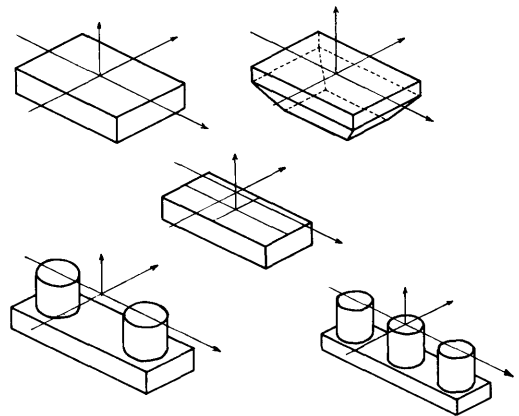


図-3 計算可能な浮体形状

4. あ と が き

本計算法はグリーン関数の計算に時間がかかるため一般には実行しにくい面があるので、当研究所の様な機関で計算を行う事には大きな意義があると考えている。また、最近グリーン関数を速く計算するアルゴリズムが考案されたという情報もあるので今後改良していきたい。

多様な物体形状に適用できるようにするために要素

分割や座標計算のプログラムをモジュール化する必要があり、現在検討中である。

参 考 文 献

- 1) O. M. Faltinsen et. al. : Motions of Large Structures in Waves at Zero Froude Number, International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in Waves (1974)

24. ランプドマス法による係留ラインの

2次元動的解析プログラム

海洋開発工学部 加 藤 俊 司

1. プログラムの目的及び概要

本プログラムは、係留ラインに働く動的張力の時系列をランプドマス法を用いて計算するプログラムである。ランプドマス法とは、係留ラインを有限個の質点に置き換え、各質点の運動方程式と質点間の拘束条件とから、各質点の運動変位及び質点間に働く張力を求める方法である。以下にその概要を述べる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

ランプドマス法による係留ラインの2次元動的解析プログラム

2.2 製作者

海洋開発工学部 加藤 俊司

2.3 製作月日

昭和57年4月製作。

2.4 計算の概要

2.4.1 係留ラインの運動方程式

係留ラインをN等分の要素に分割し、各要素jの質量 M_j 及び各要素に作用する力を一点に集中して考える。また、各質点間は重さのない直線ばねで結ばれているものとして各質点の運動と各質点間の張力を計算する。この時、各質点間の自重 W_j は両端を除く $(N-1)$ 個の分割点に集中するので、全体の係留ラインの重量を合わせる為に $j=2$ 及び $j=N$ の点の重量

を $1.5 W_j$ に修正する。図-1において、質点jに水平及び垂直に作用する力 F_{xj} 、 F_{zj} が働く時の質点jの運動方程式は質点jの質量を M_j 、法線方向、接線方向の付加質量をそれぞれ A_{nj} 、 A_{tj} とすると次式で与えられる。

$$\begin{aligned} & [M_j + A_{nj} \sin^2 \bar{\gamma}_j + A_{tj} \cos^2 \bar{\gamma}_j] \ddot{x}_j \\ & + [A_{tj} - A_{nj}] \ddot{z}_j \sin \bar{\gamma}_j \cos \bar{\gamma}_j = F_{xj} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & [M_j + A_{nj} \cos^2 \bar{\gamma}_j \\ & + A_{tj} \sin^2 \bar{\gamma}_j] \ddot{z}_j + [A_{tj} - A_{nj}] \ddot{x}_j \sin \bar{\gamma}_j \cos \bar{\gamma}_j = F_{zj} \end{aligned} \quad (2)$$

また、

$$F_{xj} = T_j \cos \gamma_j - T_{j-1} \cos \gamma_{j-1} - f_{axj} \quad (3)$$

$$F_{zj} = T_j \sin \gamma_j - T_{j-1} \sin \gamma_{j-1} - f_{azj} - \delta_j \quad (4)$$

(3), (4)式中の f_{axj} 及び f_{azj} は係留ラインの受ける抗力のx及びz方向成分であり、近似的に次式で与えられているとする。

$$\begin{aligned} f_{axj} = & -\frac{\rho}{2} D_c \bar{l} [C_{an} \sin \bar{\gamma}_j | U_{nj} | U_{nj} \\ & - C_{at} \cos \bar{\gamma}_j | U_{tj} | U_{tj}] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} f_{azj} = & -\frac{\rho}{2} D_c \bar{l} [C_{an} \cos \bar{\gamma}_j | U_{nj} | U_{nj} \\ & + C_{at} \sin \bar{\gamma}_j | U_{tj} | U_{tj}] \end{aligned} \quad (6)$$

また、

$$U_{nj} = -(\dot{x}_j - C_j) \sin \bar{\gamma}_j + \dot{z}_j \cos \bar{\gamma}_j \quad (7)$$

$$U_{ij} = -(\dot{x}_j - C_j) \cos \bar{\gamma}_j + \dot{z}_j \sin \bar{\gamma}_j \quad (8)$$

ここで、 δ_j は質点 j の水中重量、 D_j は係留ラインの等価円断面直径、 ρ は流体密度、 C_{dn} 、 C_{dt} はそれぞれ法線方向及び接線方向の抗力係数、 C_j は潮流速度、 $\bar{l}$ は要素長さである。又、一方、各質点間には次式で示す様な拘束条件式が存在する。

$$(x_j - x_{j-1})^2 + (z_j - z_{j-1})^2 = \bar{l}^2 \quad (j=2, 3, \dots, N+1) \quad (9)$$

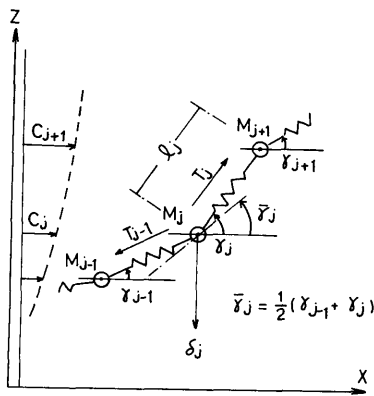


図-1 ランプドマスに作用する力

2.4.2 運動方程式の解法

本プログラムでは、次式で示すような差分方程式と(1)及び(2)式を組み合わせる係留ラインの x 方向、 z 方向の運動方程式を(12)式に示す張力 T_j の関数の形に直すことによって解いていく。

$$\ddot{x}_j^{n+1} = (x_j^{n+1} - 2x_j^n + x_j^{n-1}) / \Delta t^2 \quad (10)$$

$$\ddot{z}_j^{n+1} = (z_j^{n+1} - 2z_j^n + z_j^{n-1}) / 2\Delta t^2 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} x_j^{n+1} - 2x_j^n + x_j^{n-1} \\ z_j^{n+1} - 2z_j^n + z_j^{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_j & -P_j \\ S_j & -Q_j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_j \\ T_{j-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_j^n \\ W_j^n \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここで、 Δt は時間刻み幅、肩字は時刻 $t = n \Delta t$ を表す。また、

$$\begin{bmatrix} R_j & -P_j \\ S_j & -Q_j \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \\ I_2 & I_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \cos \gamma_j & -\cos \gamma_{j-1} \\ \sin \gamma_j & -\sin \gamma_{j-1} \end{bmatrix} \Delta t^2 \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} U_j^n \\ W_j^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \\ I_2 & I_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -f_{dxj} \\ -f_{dzj} - \delta_j \end{bmatrix} \Delta t^2 \quad (14)$$

であり、

ここで $I_1 = [M_j + A_{nj} \sin^2 \bar{\gamma}_j + A_{lj} \cos^2 \bar{\gamma}_j]$ 、

$$I_2 = [A_{lj} - A_{nj}] \sin \bar{\gamma}_j \cos \bar{\gamma}_j,$$

$$I_3 = [M_j + A_{nj} \cos^2 \bar{\gamma}_j + A_{lj} \sin^2 \bar{\gamma}_j] \text{である。}$$

今、次式で表わされる関数 ϕ_j^{n+1} を考える。

$$\begin{aligned} \phi_j^{n+1} &= (x_j^{n+1} - x_{j-1}^{n+1})^2 + (z_j^{n+1} - z_{j-1}^{n+1})^2 - \bar{l}^2 \\ &\equiv \phi_j^{n+1}(T_{j-1}^{n+1}, T_j^{n+1}) \end{aligned} \quad (15)$$

また、張力 T_j^{n+1} を次式の様に考えて(15)式を Taylor 展開し、 T_j^{n+1} が T_j^n に十分近い値として高次の項を省略すると ΔT_j^{n+1} を求める式が(17)式の様に与えられる。

$$T_j^{n+1} = \bar{T}_j^{n+1} + \Delta T_j^{n+1} \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1^{n+1} \\ \vdots \\ \Delta T_N^{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{F}_2^{n+1} \tilde{G}_2^{n+1} & 0 \\ \tilde{E}_3^{n+1} - \tilde{F}_3^{n+1} \tilde{G}_3^{n+1} & \\ 0 & \ddots & \tilde{E}_{N+1}^{n+1} - \tilde{F}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{\phi}_2^{n+1} \\ \vdots \\ -\tilde{\phi}_{N+1}^{n+1} \end{bmatrix} \quad (17)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{E}_j^{n+1} &= \tilde{P}_j^{n+1} \tilde{X}_j^{n+1} + \tilde{Q}_j^{n+1} \tilde{Z}_j^{n+1} \\ \tilde{F}_j^{n+1} &= (\tilde{P}_j^{n+1} + \tilde{R}_{j-1}^{n+1}) \tilde{X}_j^{n+1} + \\ &(\tilde{Q}_j^{n+1} + \tilde{S}_{j-1}^{n+1}) \tilde{Z}_j^{n+1} \\ \tilde{G}_j^{n+1} &= \tilde{R}_j^{n+1} \tilde{X}_j^{n+1} + \tilde{S}_j^{n+1} \tilde{Z}_j^{n+1} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\tilde{\psi}_j^{n+1} = -\frac{1}{2} [\tilde{X}_j^2 + \tilde{Z}_j^2 - \bar{l}^2]$$

$$\tilde{X}_j^{n+1} = \tilde{x}_j^{n+1} - \tilde{x}_{j-1}^{n+1}, \quad \tilde{Z}_j^{n+1} = \tilde{z}_j^{n+1} - \tilde{z}_{j-1}^{n+1}$$

2.5 計算手順

計算手順としては、まず係留ラインの初期状態を予め求めておき、この値と係留ライン上端での強制変位を用いて、次の時間ステップにおける張力 T_j^{n+1} を(16)、(17)式を繰り返し計算することによって求める。また、この際、質点の位置 (x_j^{n+1}, z_j^{n+1}) も同時に得られる。計算が終了すると次の時間ステップに移り同様の計算

を逐次行なっていく。以上の計算フローチャートを図-2に示す。

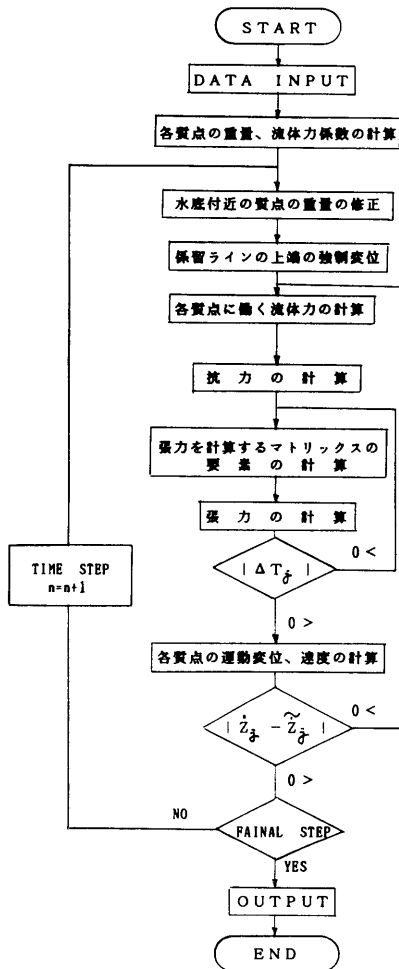


図-2 計算フローチャート

2.6 計算機種及び制限事項

1) 計算機種

FORTRAN 77, FACOMM-180 II AD

2) 制限事項

本プログラムは、二次元係留ラインのみしか扱えない。使用に必要なメモリー数は512KBで、入力制限事項は次の通りである。

係留ライン分割数 35以下

計算するデータ総数 9000以下

逆行列を求めるために、FACOM M-180 II AD 科学計算ライブラリー (SSL) 中の MINV 2 S を使用している。また、係留ラインの初期状態は予め計算しておく必要があり、この初期状態の質点の位置及び張力等をデータセットに収納しておく必要がある。さらに、係留ラインの上端の x 方向あるいは z 方向の強制変位も、計算を実行する前にデータセットに格納しておく必要がある。

3. プログラムの応用

計算するデータ数の上限を9000に取ってあるため、直接不規則変位を入力することによって不規則的に変動する動的張力の時系列を計算することができる。また、このようにして求められた不規則データをデータセットに格納しておけばスペクトル解析及び統計解析が可能である。

4. あとがき

本プログラムは2次元係留ラインのみしか取り扱えないが、容易に3次元係留ラインの場合に拡張可能である。

参考文献

- 1) 中嶋俊夫, 元良誠三, 藤野正隆: 特殊係留ラインの動的特性について, 第5回海洋工学シンポジウム, 1981。

25. 待ち時間最短化による作業計画作成プログラム

機装部 金 湖 富士夫

1. プログラムの目的および概要

組立て作業をはじめ何らかの作業を行う場合、可能な限り短い時間で終了することが重要な課題になる。

作業の所要時間を短縮する合理的な作業計画を作成する手法として、PERT (Program Evaluation and Review Technique), RAMPS (Resource Allocation and Multi-Project Scheduling) 等があるが、これらは得られた作業計画が最適のものであって、最短時間で作業を終了するものであるとの保証を提供しない。このプログラムは、限られた人数または機械を有効に用い、最短時間で作業を完了させる（すなわち人および機械の待ち時間を最小化する）作業計画を作成するものであり、基礎となる理論により、このプログラムによって得られた作業計画は所要時間を最短にするものであることが保証される。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

待ち時間最小化による作業計画作成プログラム

Program for Sheduling Activities by Minimizing Waiting Time

2.2 製作者

機装部 金湖 富士夫

2.3 製作年月

昭和57年10月

2.4 計算の概要

作業を行う人（または機械）の能力はすべて同等とし、ある要素を m 人で行って終了するまでに要した時間を t とすると、 $m \times t$ をもってその要素の要素量と定義する。各要素には携わる人数が増加しても所要時間が短くならない上限の人数が存在し、それを限界人数と呼ぶ。さらに要素間には前後関係が存在し、各要素は他の幾つかの要素が終了しないと開始できない。それを定量的に表現するため、各要素を点で、前後関係を有向線分で表わした図（作業グラフと呼ぶ）を用いることにする。また計算機プログラムに識別させるために、要素 i の次に行える要素を j とすると、 i 行 j 列を 1、それ以外を 0 とした行列（結合行列と呼ぶ）を用いる（図-1 参照）。このとき、要素番号の最初と最後はそれぞれ開始、終了を示す要素量 0 のダミーの要素とする。

作業を N 人で行い時間 T で終了したとすると、その履行状況は図-2 にて表わすことができる。各要素の要素量を w_i 待ち時間の生じている時間を t_i 、その時間に作業に携わっている人数を N_i とすれば、

$$N(T - \sum_{i=1}^n t_i) + \sum_{i=1}^n N_i t_i = \sum_{i=1}^n w_i$$

(250)

$$\therefore T = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{N} + \sum_{i=1}^n \frac{N - N_i}{N} t_i \quad (1)$$

(1)式より、作業に携わっていない人数が多ければ多いほど、また待ちを生じている時間が長ければ長いほど所要時間 T は長くなることがわかる。(1)式の右辺第2項をその作業の待ち時間と定義する。また(1)式より所要時間の下限は、 $\sum_{i=1}^n w_i / N$ である。すなわち

$$T \geq \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{N}$$

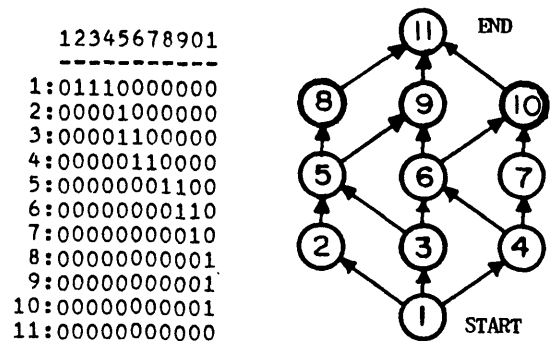
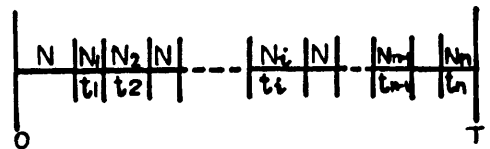


図-1 作業グラフと結合行列



$t_i : N_i$ 人 ($< N$) で行なっている時間

図-2 作業履行状況

2.4.1 並行作業要素における解

図-3 のような作業グラフで表わされる作業を並行作業要素より成る作業と呼ぶ。この場合、最短所要時間 $T_{\min}$ は、各要素の要素量を w_i 、限界人数を m_i とすると、

$$T_{\min} \geq \max_{j=1 \dots n} \left(\frac{\sum_{i=1}^n w_i}{N}, \frac{w_j}{m_j} \right)$$

しかしながら次の定理が成立する。

$$(1) \sum_{i=1}^n w_i / N \geq \max_{i=1 \dots n} \frac{w_i}{m_i} \text{ のとき}$$

$$T \min = \frac{\sum_{i=1}^n w_i}{N}$$

(2) $\sum_{i=1}^n w_i / N < \max_{i=1 \sim n} \frac{w_i}{m_i}$ のとき

$$T \min = \max_{i=1 \sim n} \frac{w_i}{m_i}$$

(1) の場合、ある時点での人数配分をベクトル $\mathbf{m}_i' = (a_1, \dots, a_n)$, $|a_i = 0 \text{ or } m_i \text{ or } N - \sum m_j (>0 \text{ and } < m_i)|$ で表わせば以下の連立方程式の解 t_i ($i = 1 \sim n$) を非負にする人数配分ベクトル $\mathbf{m}$ を構成することができ、同時に最短時間で作業を完了させる方法がわかったことになる。

$$t_1 \mathbf{m}_1 + \dots + t_n \mathbf{m}_n = \mathbf{w}$$

ただし、 $\mathbf{w}' = (w_1, \dots, w_n)$

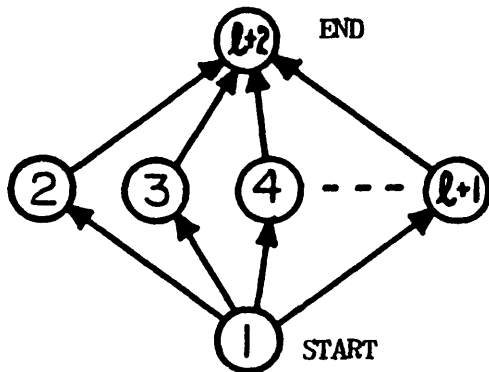


図-3 並行作業要素より成る作業

$\{6\}$ は極大集合であるが、 $\{2, 3\}$, $\{5, 6\}$ はそうではない。他に $\{1\}$, $\{2, 4, 6\}$, $\{7\}$ が極大集合である。(定義から明らかなように、初めと終わりを表わすダミー要素はそれだけで極大集合を構成する。)

(2) ライン

極大集合の前後関係を有向線分で表わし、各極大集合を点で表わした図(ライングラフという。図-5 参照)をつくり、それをもとに $\{\text{START}\}$ から $\{\text{END}\}$ までたどる際にできる極大集合の列をラインという。図-3 の例ではラインは2つあり、それぞれ、 $(\bar{1} \cdot \bar{2} \cdot \bar{3} \cdot \bar{4} \cdot \bar{5})$, $(\bar{1} \cdot \bar{2} \cdot \bar{4} \cdot \bar{5})$ である。ただし、 $\bar{1}$ $\{\text{START}\}$, $\bar{2}$ $\{2, 3, 4\}$, $\bar{3}$ $\{2, 4, 6\}$, $\bar{4}$ $\{4, 5, 6\}$, $\bar{5}$ $\{\text{END}\}$ である。

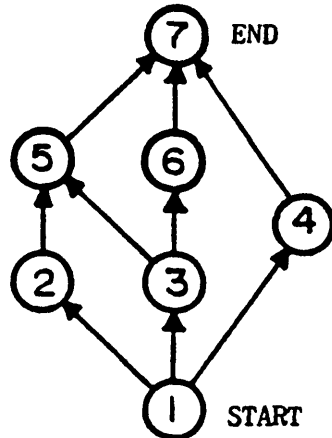


図-4 一般的な作業例

2.4.2 一般的な作業における解

要素間には一般に前後関係が存在し、すべての要素は同時には行い得ない。このような一般的な作業の最短時間完了法は、同時に行い得る要素の最適な組み合わせとそれらの組み合わせに共通する要素の最適な要素量配分をもたらすものである。この場合の解法は参考文献を参照されたい。ここでは、基礎概念として重要な2つの概念の説明を行う。

(1) 極大集合

同時に行える作業要素よりなる集合で、あと1つの要素を加えるとそれらすべては同時には行えなくなるものをいう。図-4 の例では $\{2, 3, 4\}$, $\{4, 5,$

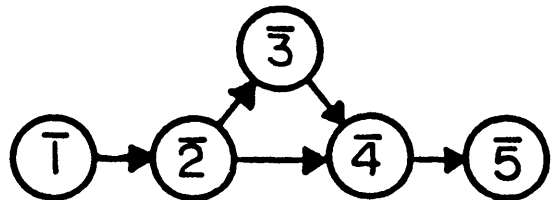


図-5 ライングラフ例

2.5 計算の手順

計算の手順は図-6 のフローチャートに示す通りである。

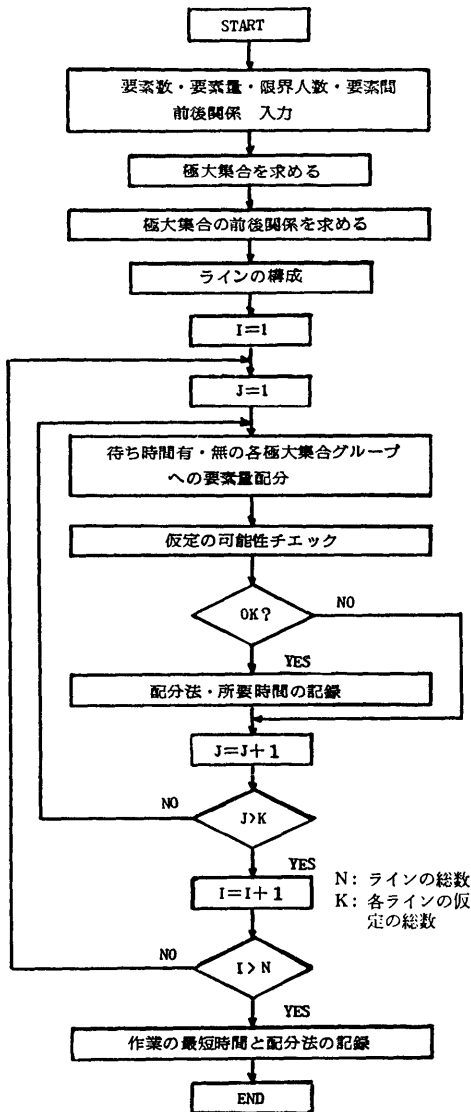


図-6 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは計算センターの M-180 II AD で作成したものである。言語は FORTRAN-77 であり、必要なサブルーチンはすべて 1 つのメンバー中に組み込んでおり、また外部関数を使用することはないので、このプログラムはどの機種のものへでも移行可能と思われる。

使用メモリー数は約 650 K B、計算時間は図-1 の例題で約 9 分である。

3. プログラムの応用

図-1 の例題を解いた結果を以下に示す。表-1 はこの例題の要素の限界人数、要素量を示し、図-7 はそれらの要素より構成された、極大集合とライングラフである。図-8 は最短の方法である。図-9 は直観によってすぐに出てくる配分方法であるが、特に要素 5 の各極大集合への要素量配分に注目すると、最短のものは、たいへん巧妙な方法であることがわかる。

なお、この手法を救命艇降下作業へ応用した例が参考文献に出ているので参照されたい。

No.	要素量 (w_i)	限界人数 (m_i)	w_i/m_i
2	5.0	2	2.5
3	7.0	3	2.33
4	2.0	3	0.68
5	8.0	2	4.0
6	2.0	4	0.5
7	5.0	2	2.5
8	5.0	3	1.67
9	5.0	4	1.25
10	3.0	3	1.0

作数人数 $N = 5$

表-1 例題作業要素パラメータ

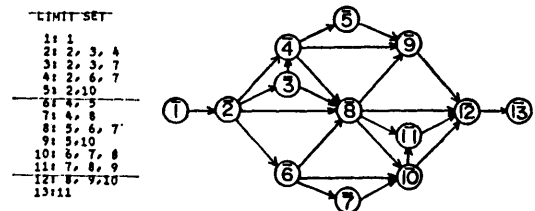


図-7 例題極大集合、ライングラフ

LINE: 1- 2- 6- 8- 9- 12- 13					
W.LIMSET: 8					
N.LIMSET: 2, 6, 9, 12					
TOTAL TIME= 8.50000					
ETIME: < 2>= 2.500, < 6>= 0.500, < 8>= 2.500,					
< 9>= 1.000, < 12>= 2.000					
ALLOCATED VOLUME					
EL/LM	2	6	8	9	12
2	5.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
3	7.0000	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.5000	1.5000	0.0	0.0	0.0
5	0.0	1.0000	5.0000	2.0000	0.0
6	0.0	0.0	2.0000	0.0	0.0
7	0.0	0.0	5.0000	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0000
9	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0000
10	0.0	0.0	0.0	3.0000	0.0

図-8 最短解要素量配分

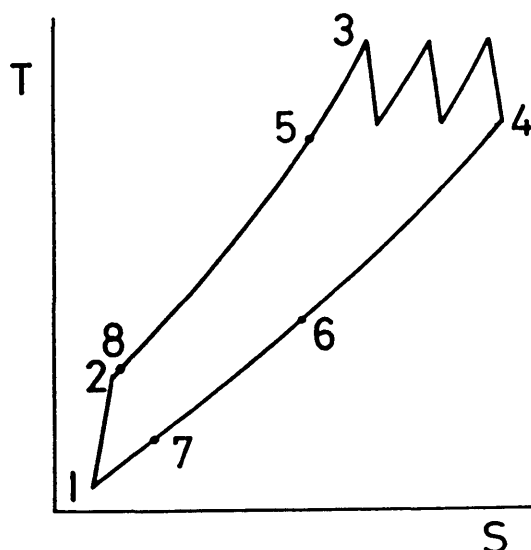


図1-2 サイクルのTS線図

2.3 製作年月

昭和59年3月

2.4 計算の概要

計算に使用する主なパラメータは、タービン入口温度、圧力比、再熱回数、圧縮機効率、タービン効率、再生器温度効率、燃焼効率、燃焼器・再生器・蒸気発生器の圧力損失、過熱蒸気温度、ピンチポイント温度差等である。全てのパラメータに標準の値を設定している。計算に必要な入力は、変化させるパラメータの名前、その数値と個数である。パラメータの標準値を変更する場合は、変更するパラメータの番号と数値を入力する。出力は、熱効率、比出力の他、各状態における温度、圧力、ガス成分割合等を出力する。

再生器の温度効率は、出口側の温度効率を計算に使用している。翼やケーシングの冷却に使用する蒸気量は、翼を一種の熱交換器と見なし、温度効率を与えて計算する。蒸気とガスの混合による圧力損失は考慮していない。

2.5 計算の手順

図-2に概略を示す。

2.6 計算機種および制限事項

FACOM M-180 II ADを使用した。使用メモリーは、約19KBである。ただし、蒸気表サブルーチンを使用するので、約30KB程度になる。

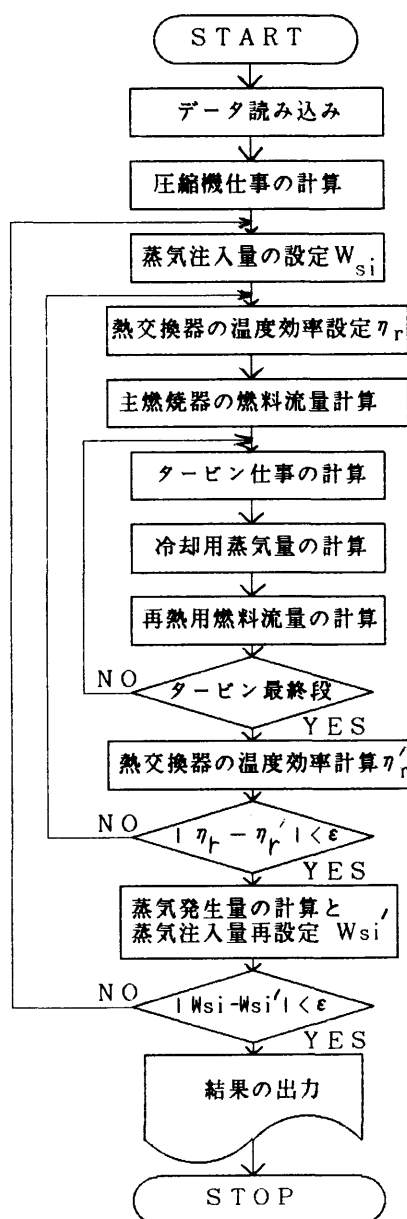


図-2 計算フローチャート

3. あとがき

このプログラムでは、燃料として水素を考えたが今は灯油、重油を燃料とするガスタービンのサイクル計算ができるように改良していく予定である。

27. 中実回転円板の動的応力解析プログラム

機関開発部 天 田 重 庚

1. プログラムの目的および概要

蒸気、およびガスタービンなどのディスクが、急激な回転変動を行う場合に内部に生ずる動的応力を解析する。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Dynamic Stress Analysis of a Rotating Disc

2.2 製作者

機関開発部 天田重庚

2.3 製作年月

昭和56年3月

2.4 計算の概要

計算は二種類のルーチンより構成される。第1は、次式を満足するような固有値 λ_n を計算する。

$$\lambda_n J_0(\lambda_n) + 2\nu J_1(\lambda_n) - \lambda_n J_2(\lambda_n) = 0 \quad (1)$$

ただし、 ν はポアソン比、 $J_i (i=0, 1, 2)$ は i 次のベッセル関数である。

第2は、(1)式で求めた λ_n を用いて回転円板内に生ずる半径方向変位 $\bar{u}$ 、半径方向と周方向応力 $\bar{\sigma}_r$ 、 $\bar{\sigma}_\theta$ を計算する。

$$\begin{aligned} \bar{u}(\bar{r}, \bar{t}) &= 4(1+\nu) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_r(\bar{r}, \bar{t}) &= \frac{2}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda_n J_0(\lambda_n \bar{r}) + (2\nu/\bar{r}) J_1(\lambda_n \bar{r}) - \lambda_n J_2(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_\theta(\bar{r}, \bar{t}) &= \frac{2}{1-\nu} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\nu \lambda_n J_0(\lambda_n \bar{r}) + (2\nu/\bar{r}) J_1(\lambda_n \bar{r}) - \nu \lambda_n J_2(\lambda_n \bar{r})}{\Phi(\lambda_n, \nu)} \\ &\times \int_0^{\bar{t}} \bar{\Omega}(\bar{t}-\xi) \sin \lambda_n \xi d\xi \end{aligned} \quad (4)$$

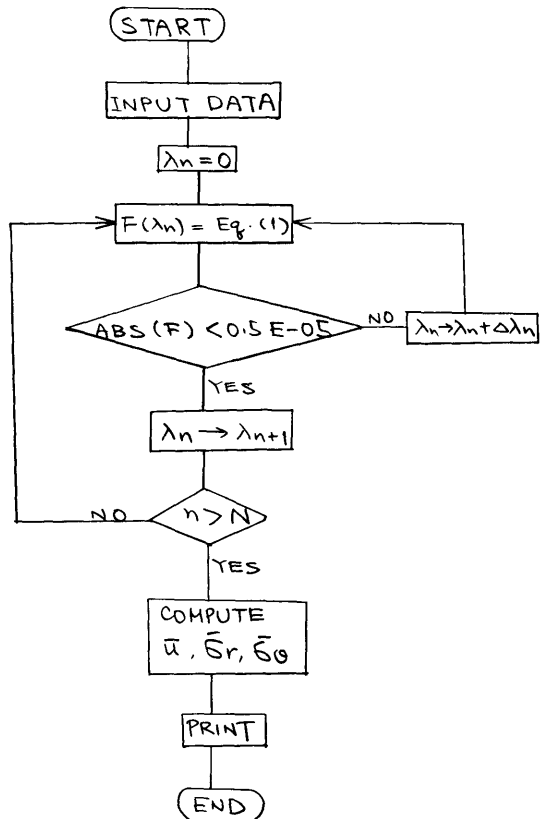
円板の変動回転過程として次の形を採用する。

$$\bar{\Omega}_1(\bar{t}) = \bar{\omega}^2(\bar{t}) = \begin{cases} (\bar{\omega}_0 \bar{t} / \bar{T}_c)^2 : 0 \leq \bar{t} \leq \bar{T}_c \\ \bar{\omega}_0^2 : \bar{t} > \bar{T}_c \end{cases} \quad (5)$$

ただし、 $\bar{\omega}_0$ 、 $\bar{T}_c$ は定数とする。

2.5 計算の手順

図-1にフローチャートを示す。主な部分は(1)式の固有値 λ_n を求める手順にあり、ここでは“はさみうち法”を採用した。



2.6 計算機種および制限事項

プログラムの大きさ：340 K B

4. あ と が き

円板内に生ずる動的応力は、(5)式の $\bar{T}_c$ に著しく依存することが判明した。他の変動回転過程についても

本プログラムを適用し、動的応力について検討したい。

参 考 文 献

天田, “中実回転円板の動的応力解析”, 日本機械学会論文集, 第49巻, 第448号, A編 (昭和58年12月), 1540—1547

28. 変動回転を受けるはりの過渡振動解析プログラム

機関開発部 天 田 重 庚

1. プログラムの目的および概要

蒸気,あるいはガスタービンのブレードの固有振動についての研究は,種々のモデルを用いて行われてきた。しかし,タービンの起動や停止時,ブレードの折損事故などによって回転が急変する場合,ブレードの振動挙動は定常振動と著しく異なることが推察される。これを解明するため,はりモデルを用い,角速度

$$\Omega(t) = \Omega_0[1 - \exp(-ct)] \quad (1)$$

Ω_0, c : 定数

にて回転変動する場合のブレードの過渡振動を解析するのが本プログラムである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

Transient Vibrations of Beams Subjected to Variable Rotations

2.2 製作者

機関開発部 天田重庚

2.3 製作年月

昭和58年8月

2.4 計算の概要

タービン・ブレードを均質,等方性の一様断面のはりに置き換える。Euler-Bernoulli 仮定に従うとし,はりの軸方向の最小振動数がはりの回転速度の10倍以上になることなどを用いると,たわみの運動方程式は次のようになる。

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} - \varphi A \Omega^2 \frac{\partial w}{\partial x} \\ \left(\frac{L^2 - x^2}{2} \frac{\partial w}{\partial x} \right)$$

(256)

$$= \varphi A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - \varphi A x \frac{d\Omega}{dt} \quad (2)$$

ただし, $E I$ は曲げ剛性, ρA は単位長さあたりの質量, L ははりの長さである。(2)式をはりの長さ方向と時間軸に沿って離散化し,その一般点を (i, j) とすれば,

$$w(i, j+1) = -w(i, j-1) - C_5 - [C_1 w(i+2, j) \\ - C_2 w(i+1, j) + C_3 w(i, j) - C_4 w(i-1, j) \\ + C_1 w(i-2, j)] \quad (3)$$

にて与えられる。係数 $C_1 \sim C_5$ は,はりの機関の性質,形状,回転数などの関数である。

2.5 計算の手順

初期条件

$$w = \partial w / \partial t = 0 \quad \text{at } t=0 \quad (4)$$

を出発値とし,境界条件

$$w = \frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0 \quad \text{at } x=L \quad (6)$$

を用いて,(3)式により時間を刻み巾ごとに進めて計算を行う。計算の終了は,(2)式の右辺の第2項, $d\Omega/dt$ がゼロに近くなった時点を経準とする。

2.6 計算機種および制限事項

プログラムの大きさ：200 K B

3. プログラムの応用

本計算では(1)式で与えられた変動回転過程を用いたが,他の変動回転過程の場合に対してわずかな変更で本プログラムを適用可能である。

4. あとがき

本計算では、最も簡単な Euler-Bernoulli 仮定を用いたが、Timoshenko はりについても解析を試む予定である。

参考文献

- (1) 天田, “変分法による変動回転するはりの運動方程式の導入”, 第33回応用力学連合講演会抄録集 (昭58年12月), 95~96
- (2) 天田, “変動するはりの過渡振動”, 第26回構造強度に関する講演会 (昭和59年7月)

29. 境界要素法による熱伝導解析プログラム

機関開発部 町田 明 正

1. プログラムの目的および概要

本プログラムは境界要素法 (直接法) による2次元熱伝導解析プログラムである。計算は定常熱伝導解析と2種類の定式化により非定常熱伝導解析を行う各々独立した3本のプログラムから成る。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

境界要素法による2次元熱伝導解析プログラム
BEMSTDH, BEMUSH1, BEMUSH2

2.2 製作者

機関開発部 町田明正

2.3 製作年月日

昭和58年1月

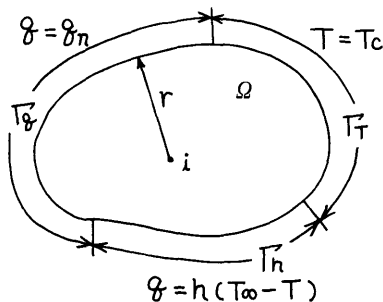


図-1 境界条件

2.4 計算の概要

境界要素法の手順¹⁾に従えば、図-1に示すような境界条件を持つ熱伝導問題に対して、領域 Ω の任意点 i に関する基礎式は基本解 w を用いて次のように表わ

せる。(内部発熱 Q を考慮しない場合)

定常熱伝導問題 (BEMSTDH)

$$C_i k T_i - \int_{\Gamma} T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_h + \Gamma_q} q \cdot w d\Gamma + \int_{\Gamma_h} h (T_{\infty} - T) \cdot w d\Gamma = 0 \quad (1)$$

$$w = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1}{r}\right) \quad (2)$$

非定常熱伝導問題 1 (BEMUSH1)

$$C_i k T_i + \frac{\rho c}{\Delta t} \int_{\Omega} T_0 \cdot w d\Omega - \int_{\Gamma} T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma + \int_{\Gamma_h + \Gamma_q} q \cdot w d\Gamma + \int_{\Gamma_h} h (T_{\infty} - T) \cdot w d\Gamma = 0 \quad (3)$$

$$w = \frac{1}{2\pi} K_0 \sqrt{\frac{\rho c}{k \cdot \Delta t}} \cdot r) \quad (4)$$

非定常熱伝導問題 2 (BEMUSH2)

$$\rho c C_i T_i + \rho c \int_{\Omega} T \cdot w d\Omega \Big|_{t=0} - \int_0^{\Delta t} \int_{\Gamma} T \cdot k \frac{\partial w}{\partial n} d\Gamma dt + \int_0^{\Delta t} \int_{\Gamma_h + \Gamma_q} q \cdot w d\Gamma dt - \int_0^{\Delta t} \int_{\Gamma_h} h (T_{\infty} - T) \cdot w d\Gamma dt \quad (5)$$

$$w = \frac{1}{4k\pi t} \exp\left(-\frac{r^2}{4Kt}\right) \quad (6)$$

ただし、 C_i は積分値、 K_0 は0次の第2種変形 Bessel 関数、 $K = k/\rho c$ 、 n は境界法線方向である。

計算は境界を有限要素法と同様な手法²⁾により離散化し、各節点の位置を任意点として、(1), (3), (5)式の積分を実行、各節点の状態量 (温度 T 、熱量 q 、熱伝達率 h) を変数とする連立方程式を組み立てる。

境界要素は2節点一次要素を、線積分は Gauss の4点積分公式を、領域積分は三角形要素3点積分公式を、連立方程式の解法は Gauss の消去法を用いた。

非定常計算での時間増分 Δt と境界条件は変化しないものとした。(5)式の積分は微小時間々隔 ($0 \sim \Delta t$) において、温度 T 、熱量 q 、熱伝達率 h が時間的に変化しないものとして計算を行った。

2.5 計算の手順

計算の手順の概略を図-2に示す。

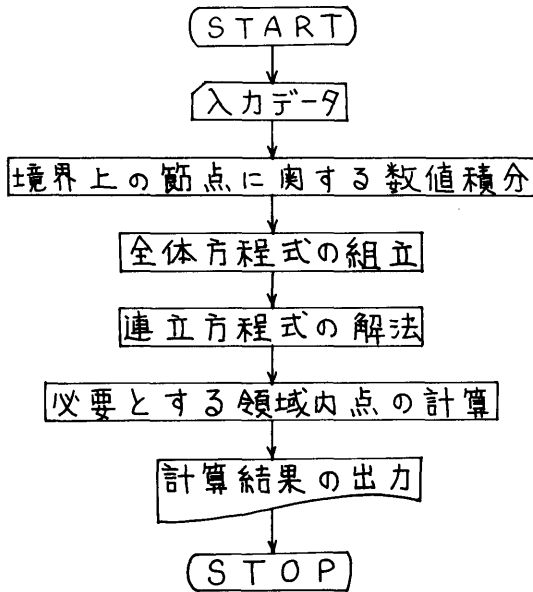


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

使用計算機は FACOM-M 180 II AD である。

使用メモリー数は定常熱伝導解析プログラム (BEMSTDH) で約120 K B (境界上の節点数 ≤ 100)、非定常熱伝導解析プログラム (BEMUSH1, BEMUSH2) で約140 K B (境界上の節点数 ≤ 100) である。ただし、取り扱える境界上の節点数の拡張は簡単に行うことができる。

3. あとがき・その他

定常計算では境界上の節点のみを取り扱えば良く、有限要素法に比べて、入力データ数を大幅に減らすことができる。³⁾ また、領域内の温度は必要とする位置の値のみ計算すれば良い。

非定常計算では領域積分が含まれるため、領域積分に必要な要素分割とその節点での温度を計算する必要から、入力データ数、計算時間は大きなもの³⁾ となり注意が必要である。

参考文献

- 1) C. A. Brebbia & S. Walker, 境界要素法の基礎と応用, 培風館, 1981. 6
- 2) Larry. J. Segerlind, 応用有限要素解析, 丸善, 1978. 1
- 3) 町田・塚田, 境界要素法による熱伝導解析 第41回船研究発表会講演集, 1983. 5

30. ホログラフィ干渉法によるブンゼンバーナ火炎の温度計算プログラム

機関性能部 佐藤 誠四郎

1. プログラムの目的および概要

光に対する気体の屈折率が密度の関数であることを利用して、従来から光干渉法を用いた気体の密度、温度、圧力などの測定が行われている。光干渉法を火炎温度測定に適用する場合、火炎内部では一般にガス組成変化を伴うので、温度を求めるには何らかの方法でガス組成を知る必要がある。

本プログラムは、大気中のブンゼンバーナ火炎の温

度を求めるため、ホログラフィ干渉法を用いてまずガス組成を空気と仮定して計算した火炎温度を基に、温度場と濃度場の相似性の仮定から火炎のガス組成分布を近似的に求め、これを用いてガス組成を考慮した火炎温度を計算する。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

ガス組成を考慮したブンゼンバーナ火炎の温度計算

2.2 製作者

機関性能部 佐藤誠四郎

2.3 製作年月日

昭和57年10月

2.4 計算の概要

ホログラフィ干渉法により火炎温度を測定するため、つぎの仮定をする。

- 1) 火炎の温度分布は軸対称とする。
- 2) 火炎では温度場と濃度場の相似性が成立つ。¹⁾

透過光を用いる干渉法では、温度分布が軸対称と仮定できる場合、光路差の関係を極座標で表わすと通称 Abel 型の積分方程式が導かれる。Abel 型積分方程式はこれまで多くの解法が提案されており、本プログラムでは最も簡単なタマネギの皮モデルと呼ばれる方法²⁾を用いた。求まった屈折率から火炎のガス組成を空気として火炎温度 T_a を計算する。

つぎに得られた火炎温度 T_a を基にして、温度場と濃度場の相似性の仮定を用い火炎のガス組成分布を求める。ただしバーナの燃料はプロパンガスなどの飽和炭化水素とする。

バーナ火炎の全領域を温度と濃度の1つの関係式で表わすのは現象的に無理があるので、図-1に示すように火炎の領域を未燃領域（領域Ⅰ）、反応領域（領域Ⅱ）、希釈領域（領域Ⅲ）の3つに分ける。燃焼反応では安定成分のみ考え、反応速度は無限大、各ガスの拡散速度は等しいと仮定する。対象成分は例えばプロパンガス燃焼の場合、 C_3H_8 、 H_2 、 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 の7種類である。

最後に求まったガス組成分布を用いて T_a からガス組成を考慮した火炎温度 T_g を計算する。

計算に用いる入力干渉縞次数、軸中心からの縞の座標、火炎直接写真などから求めた各領域の境界座標、燃料の種類、当量比などである。

以上の計算の詳細は先に報告している^{1),3)}

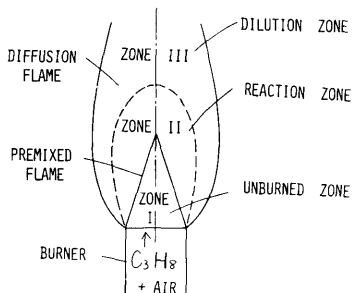


図-1 バーナ火炎モデル

2.5 計算の手順

計算の概略を図-2に示す。

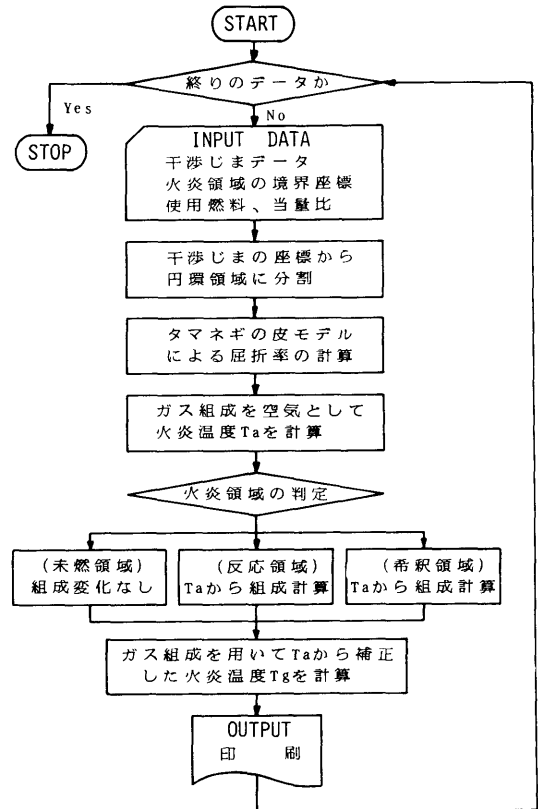


図-2 フローチャート

2.6 計算機種および制限事項

計算センター FACOM M-180 II AD 用

所要メモリー256 K B以下

3. プログラムの応用

本プログラムは軸対称火炎の場合、通常の干渉法のほか、高精度干渉測定が得られるマルチパス干渉法¹⁾の場合にも適用できる。

また本プログラムによるブンゼンバーナ火炎の温度計算結果は、別に火炎のガス組成をガスクロマトグラフによる実測値を用いた場合と比べ、1～2%以内の相違で良く一致することが確かめられている。³⁾

4. あとがき

本プログラムでは、タマネギの皮モデルによる円環

領域の分割数とその位置は、干渉縞の数と位置に合わせているため、縞が少ない場合や縞間隔が広い部分では計算点が少なく、また計算値のばらつきが大きい場合もあるので計算精度が不十分と思われる。今後例えば等間隔に円環領域を分割するなど計算方法の改良が必要である。

参 考 文 献

- 1) 佐藤ほか2, 第35回船舶技研研究発表会講演集, (1980), 144.
- 2) 日本機械学会, 技術資料, 燃焼に伴う環境汚染物質の生成機構と抑制法, (昭55), 207.
- 3) 佐藤ほか2, 日本機械学会関西支部, 第58期定時総会講演会講演論文集, 834-8, (昭58-3), 1.
- 4) 佐藤ほか2, 第16回燃焼シンポジウム前刷集, (昭53-12), 232.

31. 燃焼ガスの平衡組成計算プログラム

機関性能部 山 岸 進

1. プログラムの目的及び概要

炭化水素燃焼ガスの平衡組成を、与えられた平衡温度のもとで計算するプログラムである。公表されている大規模なプログラムはサブルーチンとして取り込むことが困難であり、¹⁾²⁾又簡易形のものに限られ目的に合わせているため適用範囲が狭い欠点がある。³⁾実際の燃焼計算においては、何らかの形で温度が与えられて、そのガス組成だけを知りたい場合が屢々ある。これだけに限ると適用範囲の広いプログラムでもかなり小形化でき、サブルーチン化しておくとお大変便利である。本プログラムは予め平衡温度を与えて熱力学的性質を求めておいて平衡組成を計算するものである。組成計算部は Huff 等の手法¹⁾を基にしており、解離式、質量保存則、分圧の式から成る非線形連立方程式を Newton-Raphson 法で解いて、燃料種、空燃比、温度について幅広い条件に対処し易くしている。また、成分の熱力学的性質は JANAF のデータを基に計算するようにした。⁴⁾

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

炭化水素燃焼ガスの平衡組成計算

2.2 製作者

機関性能部 山岸 進

2.3 製作年月日

昭和51年8月, 昭和58年8月 FACOM 用に改良

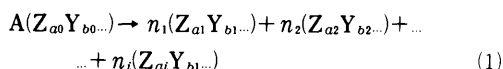
2.4 計算の概要

燃焼ガスの平衡組成を、解離式、質量保存則、分圧

の式を連立させて、Newton-Raphson 法で解いて求める。

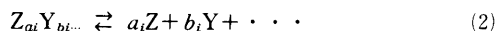
計算に際して使用する主な仮定は次の様である。(1)断熱過程, (2)理想気体, (3)定圧燃焼, (4)固体の折出が無い。

今、対象とする反応式を次の様に表わす。



A は反応式の数, Y, Z, … は元素名, n はモル数, 添字 a, b, … は成分中の原子数, 添字 0 は反応前を示し, 1, 2, … i は成分を示す。

〔解離式〕 i 成分 (Z_{ai}Y_{bi}…) が全てガス状原子に解離するとして次の式で表わす。



反応が一定容積で行われ、理想気体とすれば $p = n_i$ が成り立ち、分圧をモル分率で置き換える事ができる。

平衡状態では(2)式の平衡定数を K_i として次の質量作用則が成り立つ。

$$K_i = \frac{p_i}{p_z^{a_i} \cdot p_y^{b_i} \cdot \dots} \quad (3)$$

ここで、 p_i は i 成分の分圧を表わす。

一方、熱力学の関係から平衡定数は反応前後の自由エネルギー変化 (ΔF) を用いて次式で表わすことができる。

$$\ln K_i = (-\Delta F/RT)i \quad (4)$$

$$\Delta F = \Delta H_f - T \Delta S_f \quad (5)$$

ここで、R は気体定数、T は絶対温度、 H_f は生成

エンタルピー, S_f は生成エントロピー, Δ は反応前後の差を示す。定圧燃焼を考えている場合, ΔF はGibbの自由エネルギーになる。 K_i は理想気体で温度のみの関数となり, JANAFのデータ集では $\log K_i$ の形で与えられているが, 直接値の求まらないものは, (4), (5)式から計算する。

〔質量保存則〕各成分を構成している元素の原子数の総和は反応の前後で変化しないから次式が成り立つ。

$$a_0 = \frac{1}{A} \sum_i a_i n_i \quad (6)$$

〔分圧の式〕理想気体の状態方程式が成り立ち, Daltonの分圧則が満足される。本計算の場合分圧 P_i はモル分率 n_i で置き換えることができる。

$$P = \sum_i p_i (= \sum_i n_i) \quad (7)$$

(3), (6), (7)の非線形連立方程式をNewton-Raphson法で解く。

これは, 関数 F の $X_0 + \Delta X$ における値をTaylor展開の一次式で近似し, 関数値との差 $\Delta F = F(X_0) + F'(X_0) \cdot \Delta X - F(X_0 + \Delta X)$ を計算し, $\Delta F = 0$ を満足するように $X = X_0 + \Delta X$ を定める方法である。

まず, 推定値を与えて得られる(3)式の K_i と, 温度を与えて(4), (5)式から求まる K_i との比を求める式を作る。

収束を早めるため(3)式対数のとって微分すると, 対数で表わした増分について一次式が得られる。この式は解離式の数だけあり(8)式になる。

$$\left. \begin{aligned} x_1 - a_1 x_2 - b_1 x_3 - \dots &= -\delta_1 \\ x_2 - a_2 x_2 - b_2 x_3 - \dots &= -\delta_2 \\ &\vdots \\ x_i - a_i x_2 - b_i x_3 - \dots &= -\delta_i \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

但し, $x_i = \Delta \log x_i = \Delta \log p_i$

$$\delta_i = \log K_i - (\log p_i - a_i \log p_2 - b_i \log p_3 - \dots)$$

質量保存則(6)式において推定値から得られる $\frac{1}{A} \sum_i a_i n_i$ が与えられた a_0 に等くなったとき正解が得られたことになり, 前と同様に線形化した(9)式が得られる, 式の数はいくつかである。

$$\left. \begin{aligned} \sum_i a_i n_i x_i - A a x_A &= \delta_a \\ \sum_i b_i n_i x_i - A b x_B &= \delta_b \\ &\vdots \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

但し $x_A = \Delta \log A$

$$\delta_a = A a \log(a_0/a)$$

$$\delta_b = A b \log(b_0/b)$$

分圧の式についても同様に

$$\sum_i p_i x_i = \delta_p \quad (10)$$

但し $\delta_p = P \log P_0/P$

(8)―(10)の連立方程式を解いて, k 番目の変化分 $(x)_k$ が求まると $k+1$ 番目の推定値として次の値を用いて新たな推定値とする。

$$\left. \begin{aligned} \log(n_i)_{k+1} &= \log(n_i)_k + \lambda \cdot x_i \\ \log(A)_{k+1} &= \log(A)_k + \lambda \cdot x_A \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

求める解は(12)式で表わす誤差の総和が与えられた ϵ_0 以下になったときの n_i , A である。

$$\epsilon = \sum_i \delta_i + \log \left| \frac{a_0}{a} \right| + \dots + \log \left| \frac{P_0}{P} \right| \quad (12)$$

計算の途中で対数の真数が負にならないように λ に条件を付けて増加分が2.0を越えないようにしている。

$$\lambda = \min(1.0, 2.0/\max |x_i|) \quad (13)$$

2.5 計算の手順

図-1のフローチャートに従う。

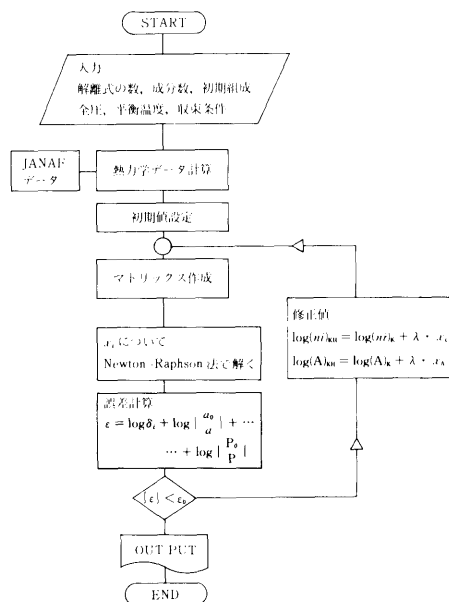


図-1 計算のフローチャート

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは初め TOSBAC 5600用に作り、後 FACOM 180 II 用に改めたもので、標準組み込み関数 (ABS, ALOG10, AMAX1, AMIN1, EXP 等) を使用している。

現在、解のマトリックスとして C_2H_2 - 空気用が組み込まれており、12成分 (H_2 , O_2 , N_2 , OH, H_2O , CO, CO_2 , NO, H, O, N, Cgas) の組成が $5000^\circ K \sim 450^\circ K$ の範囲で計算できる。その際の使用メモリーは 64 bit 浮動小数点形 (AUTODBL) で約 128K (LOAD MODULE) であり、CPU は約 0.23 sec ($3500^\circ K$) である。

マトリックスの繰返し計算を行うため、解の精度は計算機の機能に大きく依存することとなる。

例えば、本プログラムを 1 語長 128 bit の実数形で計算すると微量成分を含んだ 18 成分の計算でも収束について問題はない、64 bit 形だと初期値と温度条件に注意しなければならない、32 bit 形だと微量成分についてはかなりの制約を受けることになる。

3. プログラムの応用

本プログラムは温度が与えられた場合の平衡組成を計算してモル分率を求めるものであるが、未燃物のエ

ンタルピーが与えられた場合の燃焼ガスの平衡温度、あるいは等エントロピー変化過程の平衡温度を求めるためにそれ等の式と本プログラムを連立させて解くように改めることは容易である。

4. あとがき

平衡計算における難しい点の一つは、条件によって飛び抜けて微量な値しか持たない成分を含む時の計算精度と計算時間に関するものである。計算機によって、目的に応じた成分の選択と計算方法に工夫が必要となる。

参 考 文 献

1. V. N. Huff, S. Gorden and V. E. Morrel, NACA Report 1037 (1951)
2. S. Gorden and B. J. McBride, NASA SP-273 (1971)
3. A. G. Gaydon and H. G. Wolfhard, "Flames, Their Structure and Temperature", Chapman and Hall (1970)
4. Anon, "JANAF Thermochemical Data", Dow Chemical Co., Midland, Michigan (1967)
5. 山岸, 船研報告 Vol. 14, No 2 (1977)

32. 一体型炉蒸気発生器静特性解析プログラム

原子力船部 松 岡 猛

1. プログラムの目的および概要

船舶技術研究所に設置されている一体型船用炉模擬装置の内装貫流型蒸気発生器の静特性実験及び一般的な一体型炉蒸気発生器の静特性の解析を目的としている。

模擬炉心の一次側温度及び、蒸気発生器二次側の入口流量、入口圧力、入口温度を入力データとして与え、管内流体の伝熱および流動状態を一次元モデルにより計算する。解析結果と実験データとの比較により、計算に使用した各実験式等の評価を行う事もできる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

一体型炉蒸気発生器静特性解析プログラム
ASCOTS

A program for an Analysis of Static Characteristics of Once-Through type Steam Generator for Integral Type Reactor

2.2 製作者

原子力船部 松 岡 猛

2.3 製作年月日

昭和54年 5 月

2.4 計算の概要

蒸気発生器二次側の流れを一次元モデルとして取り扱い、伝熱管の各位置においては熱力学的平衡状態を仮定している。蒸気発生器伝熱管を多数の小区間に分割し、各小区間において定常状態の式を解き、その区

間における諸量を決定する。隣接する小区間についての解析を蒸気発生器入口部より始めて、順次進めて行き、出口部までのすべての位置における諸量を決定する。

液单相流の状態では流入した流体は、加熱が進むに従い流動様式が変化していく。この流動様式の遷移の判定も本プログラム内で実施する。

解析の結果得られる諸量は、圧力、流体温度、管内壁温度、管外壁温度、熱流束、乾き度、ボイド率、体積中心流動時間、質量中心流動時間、液相部流体速度、気相部流体速度である。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れを図-1に示す。各サブプログラムの概要を表-1に示す。

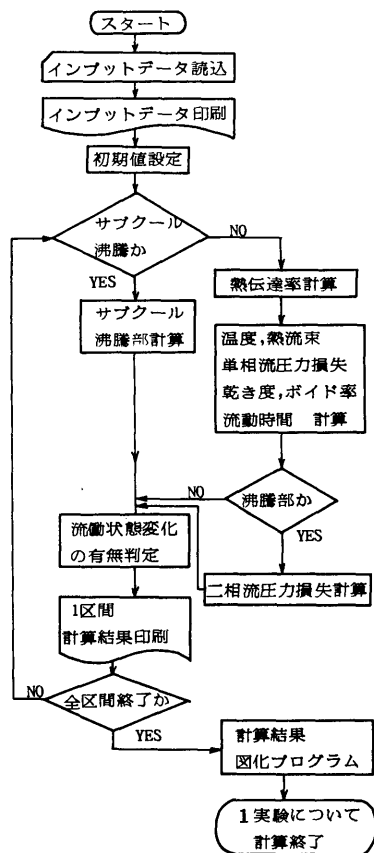


図-1 フローチャート

表-1 サブルーチンの説明

サブルーチン名	概 要
BAROC	Baroczy の方法により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
CHISHO	Chisholm の方法により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
FLOWTI	流動時間を計算する。
FRICL	摩擦圧力損失係数を計算する。
HEATTC	熱伝達率を計算する。
HLXC	コイル管部液单相流熱伝達率の計算。
HLXS	直管部液单相流熱伝達率の計算。
HSXC	コイル管部蒸気单相流熱伝達率の計算。
HSXS	直管部蒸気单相流熱伝達率の計算。
KOZEKI	小関の実験の拡張式により二相流摩擦圧力損失係数を計算する。
MQVF	乾き度, ボイド率を計算する。
MN	Martinelli-Nelson の方法による二相流摩擦圧力損失係数の計算。
NBPOSI	サブクール沸騰開始位置計算。
PDSPH	单相流圧力損失の計算。
PDTPH	二相流圧力損失の計算。
PRL	液体状態におけるプラントル数を計算する。
PRS	気体状態におけるプラントル数を計算する。
REARRA	隣接した次の小区間へ諸計算結果を受け渡す。
REL	液体状態におけるレイノルズ数を計算する。
RES	気体状態におけるレイノルズ数を計算する。

SIGM	表面張力の計算。
SLIPRA	スリップ比、流体速度を計算する
STPLÖT	計算結果図化プログラム。
SUBCOB	サブクール沸騰領域における諸量を計算する。
TBUK	一小区間下流位置における流体温度を計算する。
TCAL	管壁温度・熱流束を計算する。
TCON	伝熱管の熱伝導率を計算する。
THOM	Thom の方法により二相流摩擦圧力損失倍数を計算する。
TRQ2T3	気泡離脱開始位置における諸量を計算する。
TRPOSQ	流動様式が変化する位置における諸量を計算する。
UKIN	熱通過率を計算する。

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、本来 TOSBAC-5600 用に作られたものであるが、現在、FACOM 180 II AD においての使用が可能となっている。本プログラムの実行にあたっては、蒸気表サブルーチンを必要とする。(SLOO STEAM FORT 77) 使用コアメモリーは 220 K bites である。

3. プログラムの応用

一般の一体型炉蒸気発生器あるいは、外部条件の定まっている管内流の静特性の解析に使用できる。

4. あとがき

この静特性の解析結果は、不安定流動特性の解析の際の入力データとして使用する事も目的としている。今後、この静特性解析プログラムに対応する不安定流動特性解析プログラムの開発も行いたい。

33. 一体型船用炉自然循環実験解析プログラム

原子力船部 松 岡 猛

1. プログラムの目的および概要

船舶技術研究所に設置されている崩壊熱除去特性実験装置の自然循環実験の解析を目的としている。

自然循環実験実施の際に得られる、熱電対出力電圧、流量計出力電圧、等、生の実験データを入力として用い、実験時の体系内温度分布、熱伝達率、熱バランス、等の計算を行う。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

一体型船用炉自然循環実験解析プログラム NCE

2.2 製作者

原子力船部 松 岡 猛

2.3 製作年月日

昭和56年 8 月

2.4 計算の概要

崩壊熱除去特性実験装置の形状データ、及び、各種測定データから物理的な値への変換式は事前にプログラム内部に与えておく。

ヒータ印加電圧、電流、二次側流量計出力電圧、熱電対出力電圧を入力データとして用い、ヒータ出力、二次側流量、流速、体系内温度分布、熱流束、一次側の流体流量、熱通過率、熱交換部熱伝達率、ヒータ・ピン部熱伝達率、を計算する。

合わせて、2、3の理論式による熱伝達率も計算し実験結果との比較を行う。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れ図を図-1に示す。各サブプログラムの概要を表-1に示す。

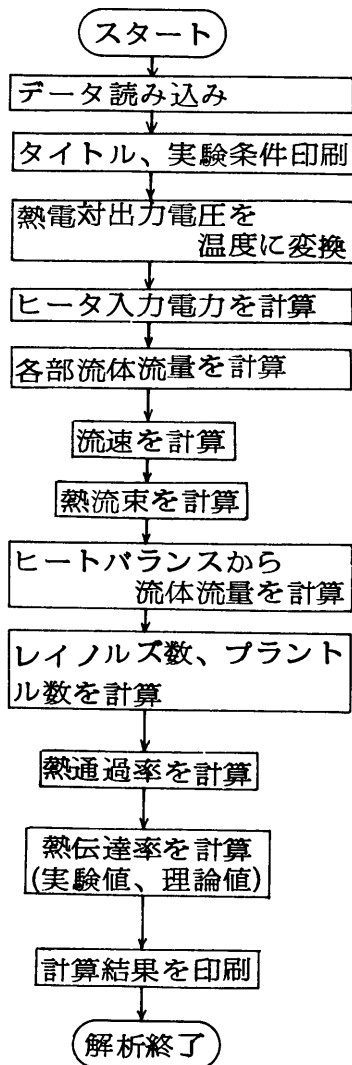


図-1 フローチャート

サブルーチン名	概 要
FLOW	流量計出力電圧値から各部における流量を計算する。
HEATP	ヒーター入力電力値を計算する。
HEATF	熱流量を計算する。更に熱バランスから、各部における流量を計算する。
HTC	局所の熱伝達率を計算する。 合わせて、McAdams の式、Fishenden の式による値も求める。
OHTC	SG 部出入口部温度差から熱通過率を求める。
PRINT	計算結果出力
REPR	レイノルズ数、プラントル数の計算を行う。
VELOC	各部における流速を計算する。

表-1 サブルーチンの説明

2.6 計算機種および制限事項

本プログラムは、FACOM-180 II AD 用に作られたものであり、蒸気表サブルーチン (SLOO. STEAM. FORT 77) を使用している。使用コアメモリは、188 K bites である。

3. プログラムの応用

本プログラムは、崩壊熱除去特性実験装置用に開発したものであるが、同様な体系の他の装置についての解析にも適用する事ができる。

4. あとがき

現在、入力データ・ファイルの作成は手作業によって行っているが、将来、フロッピー・ディスク等の利用により、収録した実験データをそのまま解析できるようにしたい。

34. フォールト・ツリー解析における不確実さ 解析プログラム“SAMPLE”

原子力船部 松 岡 猛

1. プログラムの目的および概要

フォールト・ツリー解析において、頂上事象の発生確率に対する不確実さ解析を行なう。不確実さ解析とは、故障率データに付随する不確実さの頂上事象発生確率への伝播・波及を調べる解析を意味している。

解析には、モンテ・カルロ法を用いている。本プログラムは、ラスムッセン報告（WA SH-1400）¹の中で開発、使用されたものであり、それを船舶技術研究所の計算センターで使用可能となる様、一部修正の上導入したものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

不確実さ解析プログラム SAMPLE

2.2 導入者

原子力船部 松 岡 猛

2.3 導入年月日

昭和56年1月

2.4 計算の概要

フォールト・ツリーの頂上事象を表わす構造関数を、関数副プログラムの形で与える。次に構造関数を構成する基本事象の発生確率及びその分布形を与える。故障確率の分布形は、正規分布、対数正規分布、対数一様分布のうちいずれかを選択できる。一種の分布を選択した後は、構成基本事象すべてについて同一の分布形を仮定しなくてはならない。次に、その分布形に従って一様乱数により故障確率を各基本事象に対しランダムに割り当て、頂上事象の値を計算する。この操作を多数回繰り返す事により、頂上事象の発生確率の分布が得られる。この分布から、頂上事象発生確率の中央値、平均値、90%信頼性や、標準偏差を計算する。

2.5 計算の手順

計算の概略の流れ図を図-1に示す。各サブプログ

ラムの概要を表-1に示す。

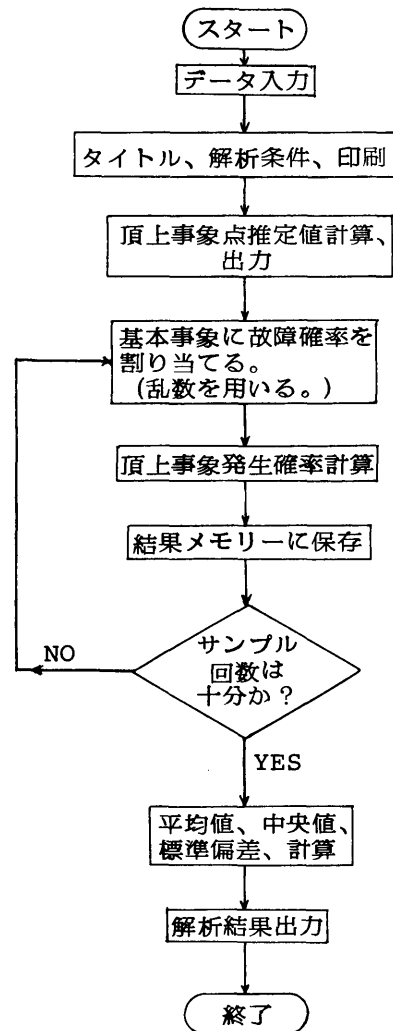


図-1 フローチャート

サブルーチン名	概 要
OUTPUT	頂上事象の確率分布の中央値、平均値、標準偏差を計算し、解析結果を出力する。
GAUSS	中央値、分散を入力とし、この分布形に従う正規分布の中の任意の一つの値を乱数を用いて選び出す。
UNIFO	中央値、区間幅を入力とし、この分布形に従う一様分布の中の任意の一つの値を乱数を用いて選び出す。
SAMPLE	関数副プログラム。頂上事象をあらわす構造関数がフォートラン形式で書かれている。

表-1 サブルーチンの説明

2.6 計算機種及び制限事項

本プログラムは、本来 IBM 360/370 用に作られていたが、FACOM 180 II AD 用に整備し、使用が可能となっている。乱数発生のため、科学用サブルーチンライブラリ中の RANU 2 サブルーチンを使用して

いる。使用コア・メモリーは144 K bites である。解析可能な最大基本事象数は100である。

3. プログラムの応用

システムの信頼性解析を行う場合必要となる、不確実さ解析に広く適用できる。その場合、フォールト・ツリー解析の方法だけでなく、例えば GO の方法²の様な構造関数が得られる解析方法であれば、すべて適用可能である。

4. あとがき

現在、入力データの一部である構造関数は、関数副プログラム中にフォートラン文で書き込み、与える方法となっている。しかし、大規模なフォールト・ツリーを解析する場合には、この構造関数は複雑膨大なものになってしまう。それ故、この構造関数のフォートランを自動的に作成するプログラムを開発する必要がある。また解析結果は、現在テーブルの形式で出力されるが、これを更に図化するプログラムを開発していきたい。

参 考 文 献

- (1) An assessment of accident risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400/NUREG-75/014 (1975)
- (2) W.Y. Gateley; An Introduction to GO, Kaman Sciences Corp. K75-94U (R). (August, 1975)

35. キャスク周辺線量率分布計算コードシステム

原子力船部 山 越 寿 夫

1. プログラムの目的および概要

使用済核燃料輸送容器（以下、キャスクと称す）の中性子、一次、二次ガンマ線に対する遮蔽性能特性関数および反射流特性関数を用い、使用済核燃料の線源データ並びに燃料収納状態に対する入力データから、精度良く、且つ簡便に中性子、一次、二次ガンマ線の線量率空間分布を計算するプログラムである。

計算プログラムは、キャスク表面の各種放射線々量率を計算する部分と、それをもとに、幾何学的データ、例えば、キャスクの形状、観測点のキャスクに相対的

な位置、キャスクどうしの相対的位置関係等を入力データとして空間線量率分布を計算する部分とから成る。

各計算部分に採用された計算手法の妥当性、モデルの妥当性は、既に検証されており、各種キャスクの代表的な型に対する特性関数の値は内蔵されている。

計算結果はグラフィック、ディスプレイおよび表として出力される。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

プログラムは、いくつかの種類の計算から成り、上記の如き目的を持ったコードシステムを形成している。で、キャスク周辺線量率分布計算コードシステムと名付けることとする。

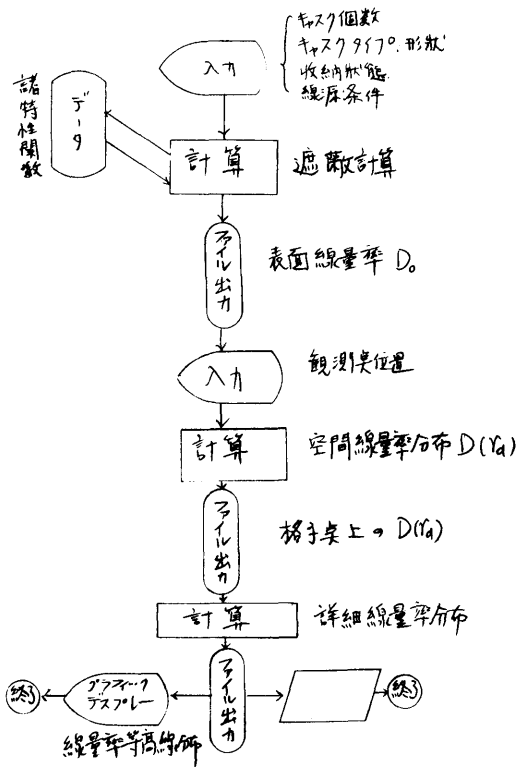
2.2 部名および製作者名

原子力船部 山越寿夫

2.3 製作年月

プログラムの大筋は昭和56年4月から58年4月の間に作成された。一部プログラムの追加が59年2月に行なわれている。

2.4 計算の概要



2.4.1 キャスク表面線量率の計算

キャスク表面の線量率 D を、以下の行列計算により求める。

$$D = (J_i^{eff})^T \cdot B \quad (1)$$

$$B \equiv \begin{pmatrix} T_n C_n + T_{n\gamma} C_\gamma \\ T_\gamma C_\gamma \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$J_i^{eff} = J_i^0 + (R_{couple})^T \cdot J_i^0 \quad (3)$$

$$R_{couple} \approx \sum_{n=1}^6 (R_c R_w)^n \quad (4)$$

ここで、(2)式の T_n 、 C_n 、 $T_{n\gamma}$ 、 C_γ 、 T_γ 、 C_γ が、中性子、一次ガンマ線、二次ガンマ線の遮蔽性能特性関数であり、既知量である。 R_c 、 R_w はキャスク壁から内筒部への反射流特性関数および、内筒部からキャスク壁への反射流特性関数である。 J_i^0 は、裸の内筒部から外部へ漏れる中性子および一次ガンマ線の流れであり、使用済核燃料の線源条件および内筒部への収納状態に依存する量である。

2.4.2 キャスク周辺線量率分布の計算

キャスク表面中央部から容器表面に垂直に進んだ径方向の線量率分布 $D_R(r_d)$ (r_d はキャスク中心軸からの垂直に測った観測点の位置) は以下の式で計算する。

$$D_R(r_d) = \frac{2D_0 J}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{r_s}{r_d} \right) \quad (5)$$

ただし、 r_s は容器表面の半径であり、 J は、楕円積分を用いて表わされる。容器高さ H 、半径 r_s 、観測点位置 r_d の関数である。 D_0 はキャスク表面の線量率である。

(5)式は、単一容器の中央高さに於ける、径方向線量率分布を与えるが、高さ方向分布に対しては、仮想高さ H_L と H_S を持つ、ふたつの仮想キャスクに対する線量率分布 $D_L(r_d)$ 、 $D_S(r_d)$ を用いて、下記の式から計算する。

$$D_H(r_d) = \frac{1}{2} (D_L(r_d) + D_S(r_d)) \quad (6)$$

(6)式は観測点の位置の高さ方向成分がキャスク高さ以上あり、底面が楕円状に見える場合は、その寄与を加算するのが本来であるが、プログラム機能としては、まだ備わっていない。

2体以上のキャスクが隣接している場合、キャスクに囲まれた領域の線量率分布は、(5)式、(6)式を用いた、各キャスク周辺線量率分布を重ね合せて計算する。

2.4.3 グラフ表示

容器周辺の線量率分布として、各空間格子点に於ける線量値を求め、内種法により詳しい分布を推定する。推定した線量率分布に対し、線量率分布の等高線分布をグラフィックディスプレイで出力すると共に、数値データを紙に出力する。

2.5 計算の手順

2.6 計算機種および制限事項

キャスク表面線量率および格子点上の線量率空間分布の計算に対しては、計算のステップ数、および記憶

容量はあまり大きくは無いので、マイクロコンピュータでも処理可能であるが、グラフィックディスプレイによる線量率分布の等高線マップを作成する部分に大きな計算ステップ数と記憶容量が要求される。

船研の計算機で線量率の等高線マップを作成する為には、512KB (Dクラス)が必要である。2体のキャスクの高さ中心を通る面上で等高線マップを描かせる為には、計算全体として約3分程度のCPU時間がかかる。

3. プログラムの応用

使用済核燃料を収納したキャスクの輸送指数評価、多種、多数のキャスクを積載した船内の線量率空間分布の評価に応用することをねらいとして作成された。

4. あとがき

キャスクの細げき部等からの放射線ストリーミング効果、および底部からの放射線の空間線量率分布への寄与を考慮したプログラムの一部追加が今後に残されている。

36. 一次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-PL, SP-Br

東海支所 竹内 清

1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を一次元平板形状および球形状に対して数値解法により解き、中性子およびガンマ線の遮蔽計算を行う。ガンマ線の輸送計算では二次的に発生する制動放射線も含めて輸送計算できるように発展させた。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

一次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-PL, SP-Br

2.2 製作者

東海支所 竹内 清

2.3 製作年月

昭和57年3月

2.4 計算の概要

基本的には二次元放射線輸送計算プログラムにおける2.4に同じである。新たに発展させた計算理論は高エネルギーガンマ線の物質透過中に発生する制動放射線も輸送計算できるようにした点である。そのために一次ガンマ線の輸送計算終了後媒質中のガンマ線束から電子対生成反応、コンプトン散乱および光電効果により発生する電子の線源を計算できるようにした。この電子線源をもとにして連続減速モデルで電子のエネルギースペクトルを各空間メッシュ点で計算できるよ

うにした。次に求められた電子のエネルギースペクトルにもとづいて制動放射線の線源を計算できるようにした。この制動放射線の線源を再びガンマ線輸送計算ルーチンへ入力して制動放射線の輸送計算ができるようにした。

2.5 計算の手順

入力データをコード使用法にもとづいて作成し、また数多くの外部記憶装置を使用するのでこれをコード使用法にもとづいて準備する。本プログラムはおおよそ37個のサブルーチンから出来上っているのでフローチャートは省略する。

2.6 計算機種および制限事項

FACOM M-200用に作られており、コア容量が2048KB確保でランを行う。

3. あとがき

一次ガンマ線原から電子の発生および電子のエネルギースペクトルから制動放射で発生する制動放射線源計算プログラムは日本原子力研究所原子炉工学部遮蔽研究室の田中俊一氏が作成したものである。

参考文献

- 1) K. Takeuchi and S. Tanaka, PALLAS-PL, SP-Br : A Code for Direct Integration of Transport Equation in One-Dimensional Plane and Spherical Geometries, JAERI-M 9695 (1981)

37. 二次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-2DCY-FC

東海支所 竹 内 清

1. プログラムの目的および概要

定常のボルツマン輸送方程式を二次元 (r, z) 形状に対して数値解法により解き、中性子およびガンマ線の遮蔽計算を行う。放射線の物質中および空気中における挙動を忠実に記述するにはボルツマン輸送方程式を解けばよい。そのために、放射線をエネルギー E 、進行方向 Ω 、空間の位置 (r, z) の変数で表わし、さらに進行方向角度を極角 θ と方位角 ϕ で表わすと放射線の挙動は (r, z, θ, ϕ, E) の関数により記述できる。計算機で解くためには $(r_m, z_m, \theta_m, \phi_m, E_m)$ のようにメッシュ点表示する。数値解法は直接積分解法にもとづく。なお、計算精度向上のために線源からの非散乱線は解析解を用いることがオプションによって出来る。この解析解は線源表面から点減衰核積分法にもとづいている。計算結果として、各エネルギー点で各空間メッシュ点での放射線束が、また各空間メッシュ点で線量率および積分放射線束が求められる。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

二次元放射線輸送計算プログラム PALLAS-2DCY-FC

2.2 製作者

東海支所 竹内 清

2.3 製作年月

昭和54年1月製作, 昭和57年4月改良

2.4 計算の概要

定常のボルツマン輸送方程式

$$\begin{aligned} & \bar{\Omega} \nabla \Phi + \bar{\Sigma}_t(\bar{r}, E) \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \\ &= \iint dE' d\bar{\Omega}' \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}', E') \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \cdot \bar{\Omega}) \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \end{aligned} \quad (1)$$

を放射線の進行方向にその飛程に沿って積分すると、

$$\begin{aligned} \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) &= \Phi(\bar{r}', \bar{\Omega}, E) \exp(-\bar{\Sigma}_t R) \\ &+ \int_0^R Q(\bar{r}'', \bar{\Omega}, E) \exp(-\bar{\Sigma}_t R') dR', \end{aligned} \quad (2)$$

ここで $R = |\bar{r} - \bar{r}'|$, $R' = |\bar{r} - \bar{r}''|$, $\bar{r}'' = R' \bar{\Omega}$,
 $\bar{\Sigma}_t \equiv \bar{\Sigma}_t(\bar{r}'', E) = \text{const.}$ であり、 Q は

$$\begin{aligned} Q(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) &= \\ & \iint \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E' \rightarrow E, \bar{\Omega}' \cdot \bar{\Omega}) \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}', E') d\bar{\Omega}' dE' \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) \end{aligned} \quad (3)$$

である。また、 $\bar{\Sigma}_s$ は中性子の散乱の場合、弾性散乱と非弾性散乱に分けて計算を行い、ガンマ線の場合はクライナー-仁科の式にもとづいて計算を行う。上記の積分は紙数の関係で省き参考文献を参照すると、数値積分の最終式は

$$\begin{aligned} Q(\bar{r}, \bar{\Omega}_{pq}, E) &= \\ &= W_m w_n \bar{\Sigma}_s(\bar{r}, E_m) f^n(E_m) I(\bar{r}, \bar{\Omega}_{ns}, E_m) \\ &+ S(\bar{r}, \bar{\Omega}_{pq}, E) \end{aligned} \quad (4)$$

のような形に表わせる。ここで、 $I(\bar{r}, \bar{\Omega}, E) = E \Phi(\bar{r}, \bar{\Omega}, E)$ である。

(3)式の積分が(4)式のように計算されると、(2)式の空間による積分は $Q(\bar{r})$ が空間メッシュ間で線型関数か指数関数で近似できるような変化をすると仮定すれば次のように計算できる。

$$\begin{aligned} & \int_0^R Q \exp(-\bar{\Sigma}_t R') dR' \\ &= \frac{1}{\bar{\Sigma}_t^2 R} [Q(\bar{\Sigma}_t) \bar{\Sigma}_t R + \exp(-\bar{\Sigma}_t R) - 1] \\ &+ Q(\bar{r}_{i-1}) \{1 - (1 + \bar{\Sigma}_t R) \exp(-\bar{\Sigma}_t R)\} \end{aligned} \quad (5)$$

線型関数近似

$$= \frac{|Q(\bar{r}_{i-1}) \exp(-\bar{\Sigma}_t R) - Q(\bar{r}_i) R|}{\ln \frac{Q(\bar{r}_{i-1})}{Q(\bar{r}_i)} - \bar{\Sigma}_t R} \quad (6)$$

指数関数近似

したがって、最終式は

$$\begin{aligned} I(\bar{r}_i, \bar{\Omega}_{pq}, E) &= \\ &= I(\bar{r}_{i-1}, \bar{\Omega}, E) \exp\{-\bar{\Sigma}_t(\bar{r}_i, E) R_i\} \\ &+ F |Q(\bar{r}_{i-1}), Q(\bar{r}_i), (\bar{r}_i, E), R_i| \end{aligned} \quad (7)$$

であり、

$$R_i = |\bar{r}_i - \bar{r}_{i-1}|,$$

$F(\quad)=$

$$\begin{cases} (5)式, Q(\bar{r}_i)=0 \text{ あるいは } Q(\bar{r}_i) \neq 0 \text{ の時} \\ \quad \frac{1}{2} \leq Q(\bar{r}_{i-1})/Q(\bar{r}_i) \leq 2 \\ (6)式, \text{上記以外} \end{cases}$$

2.5 計算の手順

入力データをコード使用法にもとづいて作り、また数多くの外部記憶装置を使用するのでこれをコード使用法にもとづいて準備する。フローチャートは複雑なので通常はブラック・ボックスにて使用する。

2.6 計算機種および制限事項

FACOM M-200用に作られており、コア容量が2048K B確保でランを行う。

3. あとがき

非散乱線束の解析計算は原子力船部金井康二主任研究官の作成したものである。本計算コードは現在可変ディメンジョン化作業が終了し、これからチェックランを行うところである。チェックしてエラーがないことを確めた後に新たにコード使用法を書く予定である。

参 考 文 献

- 1) K. Takeuchi, PALLAS-ZDCY-FC, A Calculational Method and Radiation Transport Code in Two-Dimensional (R, Z) Geometry, Papers ship Research Institute No. 57 (1979)

38. 屈曲ダクト問題に対する2次元PALLASコードによる接続計算用補充プログラム

原子力船部 金 井 康 二

1. プログラムの目的および概要

原子力船などの原子炉では遮蔽体を貫通する多くの貫通孔(ダクト)がある。この貫通孔を通して漏洩する放射線を精度よく評価するのは遮蔽設計上また安全性の面から重要であり、難しい問題の一つである。

この種の問題に対する解析手法としては、複雑形状が取り扱えるモンテカルロ法があり数多くの適用例が報告されている。一方、最近では3次元の矩形あるいは円柱形状が取り扱えるディスクリット・オーディネイト(Discrete Ordinates)輸送計算コードが開発された。Discrete Ordinatesコードでは各メッシュ点での放射線束分布が得られるため、単なる貫通孔のストリーミング評価だけでなく周辺構造物の放射線損傷・放射線発熱あるいは放射化などの安全対策を同時に評価する場合にはモンテカルロ法よりDiscrete Ordinates法の方がより優れていると思われる。

ところでモンテカルロコードやDiscrete Ordinatesコードによってダクト問題を線源を含めた全体系に対して解析することは現代の超大型計算機をもってしても、精度の良い結果を得るには長時間を必要とする。

特にDiscrete Ordinates法では次元数の増加にともなって、計算時間がべき乗の割合で急増するので計算精度を損なわない範囲内で体系のモデル化を行ない分割計算により、本来の複雑形状の問題を2次元以下の取り扱いによって計算時間の短縮をはかることは重要である。本プログラムは3次元複雑形状の屈曲ダクト問題を、1脚ごとの2次元モデルの体系に分割し、各計算を2次元用のDiscrete OrdinatesコードPALLAS-2DCY-FCで行うために必要な接続計算用に準備したものである。

2. プログラムの内容

2.1 プログラムの名称

PALTRAN —— 屈曲ダクト問題に対する2次元PALLASコードによる接続計算補充プログラム

2.2 製作者

原子力船部 金井康二

2.3 製作年月

昭和55年9月

2.4 計算の概要

2脚以上の屈曲ダクト問題を1脚ごとの分割・接続

計算によって解析する際、その解析手法は2脚の屈曲ダクト問題について確立していれば、順次その手法のくり返しによって任意の脚数の屈曲ダクト問題が取り扱える。そこでここでは2脚の屈曲ダクト問題に対する解析手法を論ずる。

図-1のような第1脚目と第2脚目のダクト中心軸が角度 $(0 < \varphi < \pi)$ で屈曲している場合、接続計算の解析手法は以下になる。

- (1) 接続面 R と第2脚目のストリーミング効果を考慮して第1脚目の形状モデルを、ダクト中心軸に関して円周方向に対称な (r, z) 形状で作成し、2次元 (r, z) 座標の PALLAS コードにより第1脚目の角度束を計算する。
- (2) 求められた各メッシュ点での角度束のうち、接続面で同心円上に対応する角度束を編集する。
- (3) 編集された角度束を第2脚目の座標系に対応するように角度変換する。この際、3次元直交座標であらわされる任意の点 $P(x, y, z)$ の方向ベクトル $\bar{\Omega}$ は図-2のように3次元直交座標系 $(\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z)$ と円柱座標系との関係式として下式が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \Omega_x &= \sqrt{1-\omega^2} \cos(\phi \pm \varphi) \\ \Omega_y &= \sqrt{1-\omega^2} \sin(\phi \pm \varphi) \\ \Omega_z &= \omega \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \Omega_z \\ \varphi &= \pm(\tan^{-1}(\Omega_y/\Omega_x) - \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(2)$$

ここで ω は円柱座標系で極角 θ の余弦、また φ は方位角をあらわし2次元 PALLAS コードに角度分点として内蔵されている。

第1脚および第2脚目の直交座標系を、それぞれ (x, y, z) および (ξ, η, ζ) とし z 軸と ζ 軸とのなす屈曲角を φ としたとき角度変換は、

$$\begin{bmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。

- (4) 第1脚目および第2脚目の両座標系に対し、接続面で放射線のカレントが保存されるように第2脚目の座標系に対応した角度束を補正する。
- (5) 求められた接続面での角度束を円板境界線源として2次元 PALLAS コードを利用して第2脚目の計算を行う。

以上のうち(2)から(4)に対応する計算が現在 PAL-TRAN と名づけコード化されているものである。

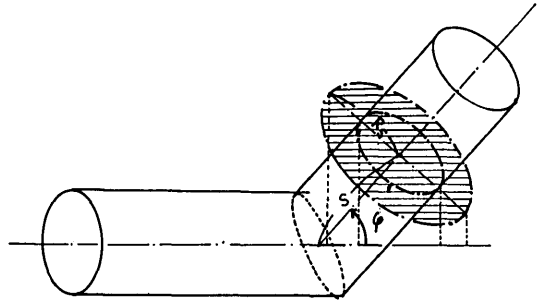


図-1 屈曲角 φ の円柱ダクト

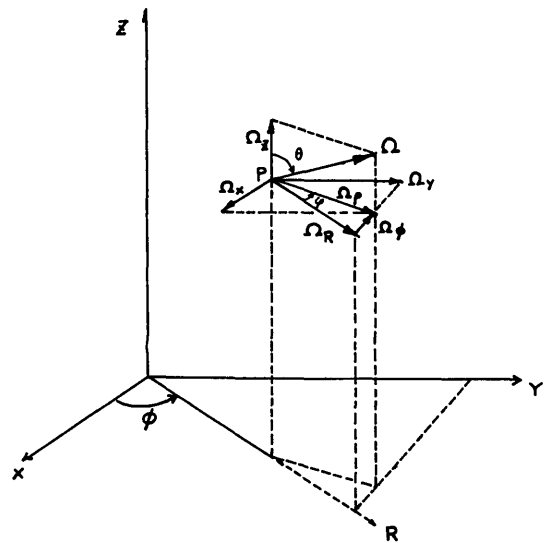


図-2 直交座標と円筒座標であらわした方向ベクトル Ω の要素

2.5 計算の手順

計算の手順は図-3のフローチャートに示す通りである。

2.6 計算機種および制限事項

このプログラムは当所中央電子計算機 FACOM M-180 II AD 用に製作したものである。実計算をする場合、本プログラムと 2 次元 PALLAS コード (PALLAS-2DCY-FC) が必要であり、PALLAS 計算を含めて本プログラムの使用メモリー数は約 2,048K バイトである。

3. プログラムの応用

本プログラムは 2 次元 (R, Z) 用 PALLAS コードを対象に作成されているが、他の Discrete Ordinates Sn コード (例えば DOT 3.5) などが取り扱えるように手直しすることは容易である。また将来への応用として円柱座標 ↔ 矩形座標の相互変換による接続計算が考えられる。

4. あとがき

本接続計算手法の精度を評価するため、B. Chinaglia らによって ETNA で行なわれた 2 回屈曲円筒ダクトストリーミング実験の解析をこころみたところ、精度は体系モデルと接続面の位置に依存するものの、実測値の再現性は良好であった。今後屈曲ダクトのストリーミング問題の解析を数多くこなすことによって精度を検討すると共にこの種の問題に対しての遮蔽解析手法を確立したいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 金井ら, 屈曲ダクト問題の 2 次元 PALLAS コードによる接続計算法, 第 37 回船研研究発表会講演集, (1981)
- 2) 金井・竹内, 2 次元 PALLAS コードを利用した屈曲ダクト問題の接続計算法, 原子力学会年会, D 52 (1981)
- 3) K. Takeuchi, PALLAS-2DCY-FC A Calculational Method and Radiation Transport Code in Two-Dimensional (R, Z) Geometry, Paper Ship Res. Inst. N 67 (1979)

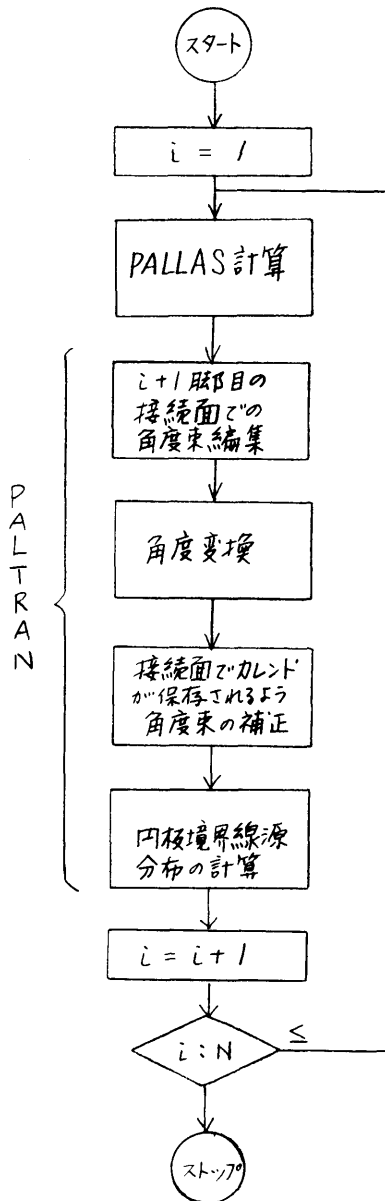


図-3 フローチャート